

ANÁLISIS ESPACIAL

APLICACIONES Y RETOS
PARA EL FUTURO



Luis Giovanni Ramírez Sánchez
Iván Vilchis Mata
Danays del Carmen Castelo Agüero
(coordinadores)

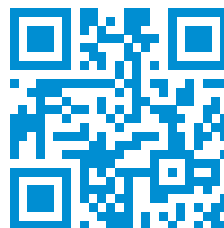
Análisis espacial

Aplicaciones y retos para el futuro



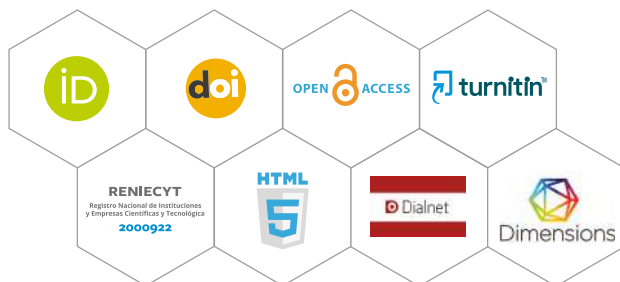
Ediciones Comunicación Científica se especializa en la publicación de conocimiento científico de calidad en español e inglés en soporte de libro impreso y digital en las áreas de humanidades, ciencias sociales y ciencias exactas. Guía su criterio de publicación cumpliendo con las prácticas internacionales: dictaminación de pares ciegos externos, autenticación antiplagio, comités y ética editorial, acceso abierto, métricas, campaña de promoción, distribución impresa y digital, transparencia editorial e indexación internacional.

Cada libro de la Colección Ciencia e Investigación es evaluado para su publicación mediante el sistema de dictaminación de pares externos y autenticación antiplagio. Invitamos a ver el proceso de dictaminación transparentado, así como la consulta del libro en Acceso Abierto.



www.comunicacion-cientifica.com

[DOI.ORG/10.52501/cc.279](https://doi.org/10.52501/cc.279)




**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES
ARBITRADAS
HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS

CC+I
COLECCIÓN
**CIENCIA e
INVESTIGACIÓN**

Análisis espacial

Aplicaciones y retos para el futuro

Luis Giovanni Ramírez Sánchez
Iván Vilchis Mata
Danays del Carmen Castelo Agüero
(coordinadores)



Análisis espacial : aplicaciones y retos para el futuro / coordinadores Luis Giovanni Ramírez Sánchez, Iván Vilchis Mata, Danays del Carmen Castelo Agüero .— Ciudad de México : Comunicación Científica, 2025.(Colección Ciencia e Investigación).

262 páginas : ilustraciones ; 23 x 16.5 centímetros

DOI: 1052501/cc.279

ISBN: 978-607-228-41-0

1. Urbanismo. 2. Desarrollo urbano sustentable. 3. Espacio (Arquitectura). I. Ramírez Sánchez, Luis Giovanni, coordinador. II. Vilchis Mata, Iván, coordinador III. Castelo Agüero, Danays del Carmen, coordinadora.

LC: NA9050 A53

DEWEY: 711.4 A53

La titularidad de los derechos patrimoniales y morales de esta obra pertenece a los coordinadores D. R. © Luis Giovanni Ramírez Sánchez, Iván Vilchis Mata, Danays del Carmen Castelo Agüero, 2025. Reservados todos los derechos conforme a la Ley. Su uso se rige por una licencia Creative Commons BY-NC-ND 4.0 Internacional, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>

Primera edición en Ediciones Comunicación Científica, 2025

Diseño de portada: Francisco Zeledón • Interiores: Guillermo Huerta

Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., 2025,
Av. Insurgentes Sur 1602, piso 4, suite 400,
Crédito Constructor, Benito Juárez, 03940, Ciudad de México,
Tel.: (52) 55-5696-6541 • Móvil: (52) 55-4516-2170
info@comunicacion-cientifica.com • www.comunicacion-cientifica.com
f comunicacioncientificapublicaciones **✉** @ ComunidadCient2

ISBN 978-607-2628-41-0

DOI 10.52501/cc.279



Esta obra fue dictaminada mediante el sistema de pares ciegos externos.
El proceso transparentado puede consultarse, así como el libro en acceso abierto,
en <https://doi.org/10.52501/cc.279>

Índice

<i>Prólogo</i>	
<i>Juan Campos Alanís</i>	13
<i>Introducción</i>	
<i>Luis Giovanni Ramírez Sánchez, Iván Vilchis Mata, Danays del Carmen Castelo Agüero</i>	19
1. Ciudad vs. vejez: análisis espacial de las barreras del entorno urbano para la movilidad de los adultos mayores	
<i>Carlos Misael Rivera Sánchez, Juan Campos Alanís y Hugo Montes de Oca Vargas</i>	25
Introducción.	26
Fundamentos teóricos y conceptuales	29
Envejecimiento en el lugar y urbanismo gerontológico . . .	29
Estructura urbana y adultos mayores: definiendo las barreras	30
Casos exitosos de ciudades	31
Envejecimiento activo	31
Movilidad potencial y accesibilidad	32
Teorías del <i>Space syntax</i>	34
Metodología para el análisis del envejecimiento y el entorno urbano	36
Fase 1. Condiciones sociodemográficas y espaciales	36

Fase 2. Entorno amigable para la población adulta mayor.	
Determinación de las barreras	39
Fase 3. Determinación de la accesibilidad potencial a	
servicios urbanos para el adulto mayor	40
Fase 4. Space syntax	43
Contexto demográfico del entorno urbano.	43
Condiciones del entorno urbano para el adulto mayor	47
Conclusiones	55
Bibliografía	59
 2. Análisis espacial de áreas con aptitud para la expansión urbana,	
mediante evaluación multicriterio	
<i>Noelia Cecilia Principi</i>	65
Introducción.	66
Teoría de la decisión y evaluación multicriterio	67
Evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica .	69
Proceso de análisis jerárquico	74
Desafíos y limitaciones de la EMC en la planificación territorial .	77
Aplicación de la EMC para expansión urbana en el partido Luján	78
Hacia el mapa de aptitud urbana	80
Definición del objetivo.	81
Base de datos geográfica	81
Análisis de aptitud	82
Determinación de preferencias-ponderación de los factores	86
Aplicación de la regla de decisión	87
Obtención del resultado	88
Discusión	89
Conclusiones	91
Referencias.	92
 3. Análisis espacial con autómatas celulares, aplicado al crecimiento	
de ciudades	
<i>Ricardo Eliú Lozoya-Ponce, Eduardo Jiménez-López y Román</i>	
<i>Sánchez Dávila</i>	95
Introducción.	96

Metodología y recopilación de datos	97
Evaluación crítica de metodologías en el contexto del crecimiento urbano.	101
Recopilación de datos y calibración del modelo	104
Aplicación de Autómatas Celulares (AC) determinista en la planificación urbana	106
Conclusión.	110
Referencias.	113
 4. Análisis espacial y relaciones socioambientales: un enfoque cuantitativo en la geografía aplicada	
<i>Ayesa Martínez Serrano</i>	117
Introducción.	118
Aspectos conceptuales y metodológicos	120
Aproximaciones teóricas de la geografía cuantitativa y su relación con la perspectiva socioambiental	120
Geografía cuantitativa y su impacto en la resolución de problemas territoriales contemporáneos.	121
El análisis espacial desde lo socioambiental	122
Limitaciones del enfoque cuantitativo	123
Propuesta metodológica	124
Compilación	124
Análisis exploratorio de los datos espaciales	130
Clasificación univariada	131
Clasificación bivariada o análisis de correlación de indicadores	131
Clasificación multivariada	133
Aplicación e interpretación de los resultados en la Zona Metropolitana de Morelia	135
Selección de indicadores	136
Aproximación del análisis univariado	137
Aproximación al análisis bivariado	141
Aproximación al análisis multivariado	145
Conclusiones	152
Referencias.	153

5. El análisis espacial: una herramienta para abordar problemas de la globalización. Análisis comparativo del servicio de Airbnb en la capital del Ecuador (Quito urbano y la conurbación de Los Valles)

Michelle Monserrath Revelo Suárez. 157

Introducción. 158

Criterios metodológicos 160

Método de recolección de datos 163

Análisis de los datos 165

Discusión 166

 Crecimiento urbano 166

 Distribución de los alojamientos 168

Dinámica espacial de Airbnb y estructuras territoriales locales de Quito urbano 177

Conclusiones 186

Referencias. 187

6. Accesibilidad potencial a equipamientos de salud y educación para el ejercicio de derechos en las comunidades del polígono de impacto del Proyecto Ecológico para el Lago de Texcoco (PELT), 2020

Karla Teresa Rojas Moreno 191

Introducción. 192

 Disparidades socioterritoriales en el polígono del proyecto para el Lago de Texcoco (PELT) 192

 Accesibilidad potencial a equipamientos como medio de distribución espacial de recursos 195

 Acceso a servicios de salud y educación como medios para potenciar el desarrollo humano. 198

Método. 201

Resultados 204

Accesibilidad a equipamiento público de salud en la zona del PELT 204

Equipamiento educativo en San Salvador Atenco y municipios colindantes. 208

Discusión 212

Conclusiones	214
Referencias.	215
7. Análisis espaciotemporal de incendios forestales en ejidos del sur de la Península de Yucatán (2012-2021)	
<i>José Francisco López Toledo, José Manuel Camacho Sanabria, Juan Carlos Alcérreca Huerta y Rosalía Chávez Alvarado</i>	
	219
Introducción.	220
Método.	223
Resultados	226
Discusión	231
Conclusiones	234
Referencias.	235
8. Análisis espacial de la región minera El Oro y Tlalpujahua, Michoacán, México, en los siglos XVIII-XIX	
<i>Pedro Gómez Molina y Pedro Sergio Urquijo Torres.</i>	
	239
Introducción.	240
La región el Oro y Tlalpujahua, un enclave minero novohispano	243
Procedimiento metodológico	246
El análisis espacial.	248
Conclusiones	259
Referencias.	260
9. El paisaje como unidad de análisis para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos de la cuenca arroyo Sabinal, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	
<i>Ana Judith de Coss Pérez, Luis Giovanni Ramírez Sánchez y Horacio Morales Iglesias.</i>	
	265
Introducción.	266
Metodología	267
Descripción del área de estudio	267
Materiales y métodos	268
Resultados y discusión	272
Susceptibilidad a deslizamientos de laderas	272

Conclusiones	280
Referencias.	281
<i>Acerca de los autores</i>	<i>285</i>

Prólogo

JUAN CAMPOS ALANÍS*

Actualmente, las sociedades enfrentan una serie de problemas cada vez más diversos y complejos relacionados con procesos ambientales, conservación de recursos, procesos sociales y económicos, que requieren respuestas y acciones urgentes y que se convierten en una prioridad en las agendas de diversos países y del nuestro. Entre estos desafíos se encuentran procesos de deterioro ambiental generados por la propia acción humana, como la expansión urbana y actividades económicas que someten a fuertes presiones al equilibrio y recuperación del entorno natural y de los recursos que de éste se obtienen. De lo anterior, emergen nuevos campos de investigación que requieren el uso de más y mejores fuentes de información, que es procesada y analizada para profundizar el conocimiento de cada tema en análisis, al igual que una mayor creatividad a la hora de proponer soluciones.

En nuestro país, las universidades y centros de investigación de han convertido en fuentes de innovación al incorporar nuevos perfiles profesionales, vertientes teóricas y herramientas para generar respuestas actuales a diversas problemáticas. En este último punto existe un consenso internacional donde el uso de la información geoespacial y el desarrollo y actualización de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) serán herramientas fundamentales para la atención a problemas naturales y sociales

* Profesor-investigador de tiempo completo de la Facultad de Geografía, UAEMex. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5391-2447>

actuales y emergentes. La revista *Geospatial World* del primer bimestre de 2020 (www.geospatialworld.net), recopiló la percepción de más de 100 ejecutivos en jefe (CEO por sus siglas en inglés) de industrias y empresas que utilizan y desarrollan la tecnología geoespacial para conocer las tendencias de estos campos de aplicación; destaca la coincidencia en la mejora de métodos y técnicas para el análisis de la información espacial, el uso de nuevas fuentes de información para su uso y modelación en muchos campos de aplicación: desarrollo urbano, servicios públicos, negocios, defensa, agricultura, ambiente, agua, desastres naturales y gobernanza, por citar los principales. Esta información coincide con el su reporte “Tendencias a futuro en la gestión de información geoespacial: la visión de cinco a diez años” que elaboró la Iniciativa de las Naciones Unidas sobre la Gestión Global de la Información Geoespacial (2013), donde se reconoce el uso creciente de la información geoespacial en el sector educativo, los tomadores de decisiones en los ámbitos gubernamental, empresarial y social para realizar tareas diversas orientadas a labores de gestión territorial, de los recursos y de la atención a las necesidades de la población.

El propósito de este libro es presentar trabajos de especialistas de varias instituciones que destacan la aplicación de las TIG, en particular de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el análisis y creación de una agenda de intervención de temas sociales y ambientales. En el primer capítulo de aborda el hecho más importante de la historia demográfica de México, que es el envejecimiento de la población. En este trabajo Rivera, Campos y Montes de Oca se enfocan en demostrar la existencia de barreras urbanas que pueden ser factores limitantes para la movilidad y disfrute de los adultos mayores, como se señala en la agenda internacional para impulsar el envejecimiento activo. Con el uso de fuentes de información innovadora, la aplicación de modelos de análisis espacial y teorías como *Space Syntax*, el capítulo demuestra la existencia de esas barreras para desplazarse por la ciudad de Toluca, demuestran como la distribución espacial de servicios clave pueden generar zonas de la ciudad con carencias en cuanto a la dotación y potencial de acceso a los mismos y cómo la misma configuración de la estructura urbana juega en contra de algunas zonas de la ciudad mientras beneficia a otras. En suma, este trabajo muestra una variedad de herramientas para abordar integralmente un problema creciente de nuestra

sociedad, pero que a la vez identifica las zonas de posible intervención en la planeación urbana gerontológica.

En el capítulo 2, Noelia Principi hace un análisis espacial de áreas con aptitud para la expansión urbana mediante “Evaluación Multicriterio en el partido de Luján” (Buenos Aires, Argentina). Plantea, a partir de la revisión teórica, un modelo explicativo que pretende optimizar la capacidad de acogida del territorio y que considera una serie de factores y restricciones a nivel local. El resultado de su trabajo se sintetiza en un mapa de aptitud urbana con la identificación de las áreas óptimas para el desarrollo o la expansión urbana, insumo fundamental para la planeación.

El uso de modelos predictivos para modelar la expansión de las ciudades se ha convertido en una línea de investigación muy atractiva como parte de las agendas de muchas instituciones. El uso de autómatas celulares es una herramienta que ha demostrado un alto nivel de precisión por la similitud de los resultados con lo observado en la realidad. En este sentido, en el capítulo 3, Ricardo Eliú, Eduardo Jiménez y Román Sánchez, aplican esta herramienta para simular y predecir la transformación urbana, integrándola a un Sistema de Información Geográfica (SIG), para facilitar su manejo. En el trabajo se documentan las reglas con las que fue calibrado el modelo, a fin de representar fenómenos urbanos apegados a la realidad y con alto potencial para su aplicación en la planificación urbana. En la parte final del trabajo, se analiza la necesidad de incorporar factores adicionales que mejoren la metodología, con miras a alcanzar una mejora en los modelos de planificación urbana e inteligencia territorial.

Ayesa Martínez presenta un ejercicio de geografía aplicada en el capítulo 4, donde destaca la necesidad de entender las interrelaciones entre la población y el ambiente, proponiendo un análisis socioambiental que aborda principalmente la dimensión territorial de esas relaciones entre sociedad y entorno. En su trabajo destaca las etapas de compilación de datos, la aplicación de técnicas de análisis espacial y la diferenciación de áreas geográficas a partir variables e indicadores seleccionados. El uso del Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (ESDA, por sus siglas en inglés), le permitió establecer patrones espaciales y estructuras heterogéneas que son la base de la gestión territorial y el desarrollo sostenible, cerrando el capítulo con una propuesta de modelo de diferenciación espacial socioambiental para áreas metropolitanas.

El comercio y los servicios han tenido una evolución muy importante a raíz del uso de los medios de comunicación y redes sociales a través de la red, pues a través de ella se tiene promoción permanente, a bajo costo y se llega a un amplio auditorio. Los servicios de alojamiento temporal como Airbnb ofrecen a los propietarios de inmuebles y usuarios ventajas como la reducción de la intermediación y costos de alquiler más bajos, sin embargo, estas ventajas han propiciado la proliferación de estos servicios, al grado de convertirse en un reto para la planificación y el ordenamiento territorial, tema que se aborda en el capítulo 5 de esta obra. Michelle Revelo analiza el caso del comportamiento de los inmuebles de alquiler en dicha plataforma de la ciudad de Quito, Ecuador, donde se hace uso de la información geolocalizada de las propiedades en alquiler y mediante el uso de análisis espacial identifica los patrones de comportamiento y los efectos latentes en otros procesos urbanos, como la gentrificación en la capital ecuatoriana.

La accesibilidad es la facilidad con la que una persona se puede desplazar de un lugar a otro por diversos motivos. La salud y la educación se consideran derechos fundamentales de las personas, sin embargo, cuando se analiza su distribución espacial y capacidad de las unidades de servicio, se empiezan a identificar desigualdades espaciales en el acceso que afectan el bienestar de la población. En este sentido, Karla Rojas aborda, en el capítulo 6, el caso de la accesibilidad potencial a estos dos servicios la zona que comprendía el Proyecto para el lago de Texcoco, con el fin de diagnosticar la accesibilidad para una población con la necesidad de mejorar sus condiciones de bienestar, al tiempo que busca la preservación de su territorio. En este trabajo se abordan una serie de modelos que permiten evaluar la accesibilidad diferencial que padecen los residentes de la zona, utilizando técnicas como las isócronas, el método de cobertura flotante de dos zonas y la capacidad instalada de los servicios, todo bajo ambiente SIG.

En el capítulo 7 se aborda el tema de los incendios como una amenaza creciente que afecta tanto el entorno natural como el antropizado, por lo que es necesario tener información espacial oportuna y útil para poder hacer frente a las conflagraciones. El aporte principal de este trabajo es la propuesta de un Índice Espacio Temporal de Incendios Forestales (IETIF), que se levante a partir del comportamiento de los incendios forestales en el sur de la península de Yucatán en un periodo de diez años (2012-2021).

El uso de diversas TIG a lo largo del capítulo arrojan como resultados la identificación de zonas críticas de afectación por incendios que deben ser la base para el diseño de políticas para su prevención y atención.

El uso de los SIG para analizar el comportamiento histórico de hechos y fenómenos está limitado a la disponibilidad de datos espaciales. Gómez y Urquijo hace una propuesta de generación de mapas históricos en el capítulo 8 de esta obra, relativa a los aprovechamientos mineros en la región de El Oro, Estado de México y Tlalpujahua en Michoacán, haciendo la interpretación histórica de documentos y registros en los siglos XVIII y XIX. La conformación de los SIG con orientación histórica nos muestra la versatilidad de estas herramientas para la reconstrucción de la intervención del ser humano en el entorno.

El capítulo final aborda un tema de actualidad relacionado con los desastres naturales. Se analizan los deslizamientos de ladera que, de la Cuenca del Arroyo Sabinal en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, con el propósito de evaluar la susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos a partir del análisis de unidades de paisajes físico-geográficos. Se empleó la metodología Mora-Vahrson modificada y adaptada a uso del SIG; se identificaron como condicionantes a la pendiente, la litología, el tipo de suelo y el uso de suelo. La metodología, que es replicable en otros territorios del país con condiciones similares, permitió determinar que poco más de una cuarta parte de la cuenca tiene grados de susceptibilidad alta y muy alta abarcan y coinciden con paisajes de montañas, lomeríos y piedemonte. En suma, los resultados de esta investigación son una herramienta de base para la instrumentación de estrategias de mitigación y/o prevención.

Los trabajos que integran esta obra sin duda muestran la diversidad de aplicación que tienen las TIG para abordar temas muy diversos a múltiples escalas. De igual forma, revelan la utilidad de estas herramientas en diversos campos del conocimiento, donde los investigadores las han ido adoptando y adaptando a sus objetos de investigación, fuentes de información y revelando un mayor potencial para futuros trabajos. Esperamos que cada capítulo sea de utilidad para el lector interesado en el análisis de los problemas de ocurren en el territorio y sean el punto de inicio de nuevas aplicaciones.

Introducción

LUIS GIOVANNI RAMÍREZ SÁNCHEZ*

IVÁN VILCHIS MATA**

DANAYS DEL CARMEN CASTELO AGÜERO***

Vivimos en un mundo en el que de manera cotidiana interactuamos y nos relacionamos con el espacio y el tiempo, una combinación dinámica inseparable que solemos denominar espaciotemporal y, de manera sintetizada espacial. El concepto espacial es relativo no absoluto, hay quienes lo perciben de manera objetiva o subjetiva, real o imaginaria, material o inmaterial.

Algo muy significativo que planteó Waldo Tobler al establecer la primera ley de la geografía, fue poner como centro de gravedad, el contexto recíproco del espacio que nos rodea y la forma de relacionarnos con él (e.g. económica, social y ambiental), la clave es la práctica diversa de la interacción espacial, que nos remite a una multiplicidad de usos y planteamientos únicos y complejos del significado espacial.

En este sentido, el pensamiento espacial se centra en las habilidades cognitivas que son adquiridas a través del análisis espacial, al permitir plantear desafíos de investigación con características interesantes que parten desde la concepción del espacio, pasan por el uso de herramientas teóricas, metodológicas y tecnológicas para su análisis, hasta converger en un proceso

* Doctor en Geografía. Investigador por México SECIHTI-El Colegio Mexiquense A. C. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0509-3413>

** Doctor en Ciencias del Agua. Investigador por México SECIHTI-El Colegio Mexiquense A. C. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3275-585X>

*** Doctora en Geografía. Investigadora Posdoctoral SECIHTI-El Colegio Mexiquense A. C. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9111-9469>

de reflexión y generación de conocimiento que pueden ayudar a dar mayor solidez a los enfoques tradicionales no espaciales.

El análisis espacial ha evolucionado de tal manera que ha pasado de ser una simple herramienta para especialistas, a convertirse en una disciplina multidisciplinaria que ha impactado de manera positiva en diferentes áreas del conocimiento (salud, economía, ambiente, ciencias sociales, entre otras). El análisis espacial se privilegia de interpretar, visualizar y modelar datos geográficos, lo que ofrece la posibilidad de enlazar datos espacio-temporales con la intención de revelar patrones y relaciones que de otro modo serían imposibles de identificar. A continuación, se describen algunas de sus principales aplicaciones:

- a. Planificación y desarrollo urbano.** Con miras a diseñar ciudades más eficientes, sostenibles y resilientes el análisis espacial permite: optimizar la distribución del espacio urbano, planificar sistemas de transporte, evaluar la expansión urbana y gestionar riesgos urbanos.
- b. Gestión de recursos naturales y conservación ambiental.** El análisis espacial es una disciplina clave en la sustentabilidad ambiental con acciones como: monitoreo de cambios en el uso del suelo, protección de la biodiversidad, gestión hídrica y mitigación de los efectos del cambio climático.
- c. Seguridad alimentaria y agricultura de precisión.** En este sector el análisis espacial ayuda a: optimizar el uso de la tierra, monitorear cultivos y planificar sistemas de riesgo.
- d. Evaluación de riesgos y gestión de desastres.** En temas relacionados con riesgos el análisis espacial es esencial para: mapear zonas de peligro, diseñar planes de evacuación, prevenir desastres y elaboración de atlas de riesgos.
- e. Salud pública y epidemiología.** El análisis espacial contribuye a un mejor abordaje de la salud pública mediante: el monitoreo de enfermedades, la planificación de servicios de salud y la detección de determinantes sociales de la salud.
- f. Logística y transporte.** Con la finalidad de mejorar la eficiencia operativa del transporte, el análisis espacial ayuda en: la optimización de rutas; la planificación de infraestructuras y la gestión de flotas.

- g. Estudios socioeconómicos y políticas públicas.** El análisis espacial contribuye al diseño y evaluación de políticas públicas a través del: mapeo de desigualdades sociales, desarrollo de programas focalizados y análisis de dinámicas poblacionales.
- h. Investigación científica y tecnológica.** El análisis espacial, al ser una disciplina interdisciplinaria permite: elaborar modelos climáticos, identificar yacimientos de minerales (geología y minería) y descubrir patrones de asentamientos humanos antiguos (arqueología).

Aunque el análisis espacial ha transformado nuestra capacidad para comprender y gestionar el espacio, asimismo enfrenta retos por demás desafiantes que, de no abordarse de una manera adecuada, pueden limitar su alcance e impacto. A continuación, se presenta una descripción de los principales desafíos que enfrenta el análisis espacial:

- i. Manejo y procesamiento de grandes volúmenes de datos espaciales.** La producción a gran escala de datos geoespaciales implica un reto técnico importante: almacenamiento de un gran volumen de datos masivos, heterogeneidad de los datos, procesamiento en tiempo real y calidad y precisión de los datos.
- j. Brechas en el acceso y uso de tecnologías espaciales.** El acceso a las tecnologías de análisis espacial implica: costo elevado, acceso desigual a datos e infraestructura limitada.
- k. Desarrollo y mantenimiento de estándares de interoperabilidad.** La integración de datos espaciales provenientes de diversas fuentes requiere estándares que garanticen su compatibilidad y reutilización, lo que provoca que exista: falta de estandarización global, actualización de sistemas y dependencia de sistemas propietarios.
- l. Capacitación y formación de profesionales.** Los principales retos del análisis espacial en este sector son: déficit de profesionales capacitados, barreras educativas y falta de formación interdisciplinaria.
- m. Retos éticos en el uso de tecnologías espaciales.** El manejo de información geoespacial confidencial plantea dilemas éticos como: privacidad y vigilancia, uso indebido de los datos y desigualdad en la toma de decisiones.

- n. Limitaciones en el modelado y predicción.** Aunque el análisis espacial ha avanzado mucho, aún presenta limitaciones en cuanto a su capacidad para modelar y predecir fenómenos complejos, sus principales retos son: incertidumbre en los modelos, variabilidad temporal y espacial, y falta de datos históricos.
- o. Adaptación a problemas emergentes.** El análisis espacial debe seguir evolucionando para abordar los desafíos globales y emergentes como: el cambio climático, la urbanización acelerada y los fenómenos globales complejos.
- p. Promoción de la participación comunitaria.** El análisis espacial a menudo se centra en herramientas técnicas, pero es muy importante incluir a las comunidades en el proceso con el fin de: descentralizar el conocimiento, incorporar el conocimiento local y facilitar la accesibilidad a la información geoespacial.

El análisis espacial puede cambiar la forma en que entendemos y gestionamos el espacio, pero su éxito a largo plazo depende de cómo respondamos a los desafíos que nos presenta, ya que es necesaria una combinación de avances tecnológicos, educación interdisciplinaria, políticas públicas inclusivas y un compromiso ético con el uso responsable de las herramientas que nos ofrece el análisis espacial.

Una vez expuestas las ventajas y retos que enfrenta el análisis espacial surge la pregunta: ¿por qué hacer un libro sobre análisis espacial? La respuesta a esta interrogante es que se busca proporcionar un marco conceptual sólido y ejemplos prácticos de análisis espacial. Más allá de los aspectos técnicos, el contenido de este libro nos invita a considerar el papel del análisis espacial como catalizador de la sostenibilidad, la resiliencia y la justicia social. Con esta perspectiva, se espera impulsar al lector a explorar cómo el análisis espacial puede contribuir no sólo a comprender mejor el espacio, sino también a transformarlo para afrontar los desafíos que nos depara el futuro.

Este libro ilustra el valor agregado de la perspectiva espacial a través de nueve destacados ejemplos en México, Argentina y Ecuador, orientados a la aplicación del análisis espacial como campo de conocimiento capaz de integrar el *dónde* (espacio y lugar) y el *cuándo* (tiempo), a marcos concep-

tuales y metodológicos diversos, aplicados a retos y desafíos del siglo XXI, como es el envejecimiento poblacional desde la perspectiva de accesibilidad y movilidad de la población adulta mayor a las oportunidades urbanas; el crecimiento y expansión de las ciudades modelados con autómatas celulares y evaluación multicriterio; la gestión del territorio a partir de un modelo de diferenciación socioambiental; la dinámica territorial disruptiva de gentrificación por actividades económicas y servicios web de aplicación virtual entre usuarios y proveedores; la distribución y accesibilidad territorial de bienes asociados a equipamientos de salud y educación; la construcción de indicadores de amenaza de recursos forestales y la biodiversidad por la recurrencia de incendios forestales; la transformación historiográfica territorial a partir de la producción metalúrgica y la susceptibilidad de ocurrencia de deslizamientos de laderas a partir de unidades de paisajes físicogeográficos.

Cada capítulo pretende fomentar las habilidades investigativas de estudiantes y académicos para entender y mejorar la comprensión de los enfoques analíticos espaciales en las dinámicas de la sociedad, del ambiente y del territorio, lo cual implica desafíos progresivos de extensión, conexión y fusión de diversas disciplinas científicas en continua evolución, enfocadas en el estudio y toma de decisiones en problemas y fenómenos socioespaciales.

Con esta publicación se pretende promover la investigación científica para comprender patrones y procesos espaciales, en el entendido de que el enfoque espacial desempeña un papel clave para la sociedad. Su utilidad social radica en examinar y vincular datos desde perspectivas espaciales con métodos cualitativos y cuantitativos, para lograr una integración potencial del conocimiento con herramientas (métodos y técnicas globales y locales de análisis espacial) fundamentales como son: la visualización cartográfica, los sistemas de información geográfica (SIG), el reconocimiento de patrones, el análisis estadístico espacial, las metodologías basadas en lugares y la inteligencia artificial.

Este libro está dirigido a aquellos interesados en ampliar sus conocimientos de las teorías sociales convencionales y en avanzar al enorme potencial que ofrece el análisis espacial en el estudio y la resolución de problemas actuales de la realidad territorial con amplio espectro económico, social y ambiental, como parte de los factores causales y explicativos

que subyacen en la generación y transferencia de conocimiento con enfoque espacial.

Finalmente, esperamos que los aportes teóricos del pensamiento espacial y los planteamientos del análisis espacial que en la presente obra se plasman ayuden a entender que casi todo fenómeno, proceso o problema económico, social y ambiental, tienen una dimensión espacial indispensable para la sociedad.

1. Ciudad vs. vejez: análisis espacial de las barreras del entorno urbano para la movilidad de los adultos mayores

CARLOS MISAEL RIVERA SÁNCHEZ*

JUAN CAMPOS ALANÍS**

HUGO MONTES DE OCA VARGAS***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.279.01>

Resumen

El crecimiento urbano ha aumentado las distancias entre viviendas y los bienes y servicios que demanda la población para sus actividades cotidianas, afectando especialmente a grupos vulnerables en áreas alejadas. Simultáneamente, el envejecimiento poblacional es una preocupación global, notable en el mundo y en México por la velocidad con la que se está registrando este proceso, producto de la transición demográfica en el siglo xx. El Estado de México es una de las entidades federativas donde dicha transición se evidencia más significativamente, dada su historia demográfica y por haber sido una de las entidades que recibieron importantes flujos de inmigrantes a raíz de la hegemonía que tuvo la Ciudad de México como centro económico, político y administrativo en ese periodo, de ahí se estima que la población adulta mayor será un grupo predominante a mediados del siglo xxi.

El objetivo de este trabajo es analizar el papel de la estructura urbana en las posibilidades de acceso y movilidad en la población mayor de sesenta

* Egresado del Programa de Especialidad en Cartografía Automatizada, Teledetección y SIG, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8792-3364>; correo: criveras299@alumno.uaemex.mx

** Doctor en Geografía. Profesor-investigador de tiempo completo de la Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5391-2447> ; Scopus: 55372360700

*** Doctor en Estudios de Población. Profesor-investigador del Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8844-7717> ; Scopus: 35079046400

años. Los resultados muestran que la concentración de servicios en áreas con mejor equipamiento e infraestructura generan diferencias espaciales en el acceso a las oportunidades urbanas, además de que la configuración de la red vial afecta la movilidad de los mayores.

Palabras clave: *entorno urbano, accesibilidad, infraestructura, envejecimiento demográfico.*

Introducción

Las limitaciones de los adultos mayores en el entorno urbano de residencia no es un fenómeno reciente, sino el resultado de un proceso histórico ligado al crecimiento de las ciudades, la creciente concentración demográfica en ellas y a la ausencia de una visión de planeación que considere el cambio en las necesidades de la población, a medida que esta crece y se envejece. Estos factores han moldeado las ciudades mexicanas, generando brechas de desigualdad e inaccesibilidad para distintos grupos etarios; por ello, comprender la evolución urbana y demográfica desde esta perspectiva permite identificar las barreras que afectan la posibilidad de desplazamiento y el bienestar de los adultos mayores.

A partir de la década de los cuarenta, México ha tenido un crecimiento urbano que se ha influenciado por distintos procesos como: concentración, invasión, sucesión, segregación, centralización y descentralización (Unikel, 1976), lo que ha provocado un crecimiento sin una continuidad espacial y, por lo tanto, una dispersión urbana (Montejano-Escamilla *et al.*, 2023). Además, el crecimiento de las ciudades está relacionado con el de la población, al punto que, de acuerdo con datos del Banco Mundial (2022), el 81% de la población en el país es urbana.

De manera paralela al proceso de urbanización, México y otros países están registrando un proceso de envejecimiento demográfico acelerado que se caracteriza por la disminución de la fecundidad y mortalidad, en conjunto con el aumento de la esperanza de vida (Montoya y Montes de Oca, 2006; Spijker, 2023). Esta transición demográfica hacia el envejecimiento cobra cada vez más relevancia a nivel mundial. Tan sólo en Améri-

ca Latina y el Caribe se estima que la población adulta mayor incrementa de un 13.4% a 16.5% para el 2030 y hasta un 30% para el año 2060 (CEPAL, 2022). Para el caso de México, se prevé un aumento de adultos mayores en el primer quinquenio de la siguiente década, población que será más longeva y conformará un grupo demográfico importante en la población mexicana (Cárdenas, 2022; Álvarez-Lobato *et al.*, 2018; CEPAL, 2022).

Esto implica retos en la generación de políticas públicas, pues como detalla Campos (2023) el envejecimiento se modifica con el tiempo y en el espacio de distinta manera. Según el autor, el Estado de México se posicionaba para el año 2000 en el lugar 29, según el nivel de envejecimiento, y de acuerdo con su trayectoria demográfica, para el 2030, 2050 y 2070, la entidad se ubicará en el octavo lugar para el primer año; en el quinto lugar para el segundo y tercer año, con un 15.2%, 26.1% y 37.9%, respectivamente, de población de 60 años y más, de acuerdo con las proyecciones de población del CONAPO (2024). Para el caso de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) el autor indica que la distribución espacial de la población envejecida residente está replicando el patrón de crecimiento de la ciudad de Toluca.

Con la información que proporciona Aranda (2000), Sobrino (1995) y Garza (2010), se puede observar que el envejecimiento demográfico en Toluca se ha desarrollado por migración laboral a causa de la industrialización. Entre los años 60 y 70, se impulsó el desarrollo industrial de Toluca con la construcción del corredor industrial Toluca-Lerma, fue así como técnicos especializados y obreros calificados que provenían principalmente del Distrito Federal (hoy Ciudad de México) empezaron a asentarse en la ciudad y demandar vivienda, educación y servicios, consolidando importantes barrios y colonias obreras. Después del sismo de 1985, la Ciudad de México expulsó alrededor de 400 mil personas, de las cuales cerca de 230 mil eligieron como destino el Valle de Toluca, lo que les permitió mantener los nexos de trabajo y bienestar social que ofrece la megaurbe. Estos desplazamientos trajeron consigo transformaciones territoriales y sociales que han acelerado el proceso de envejecimiento en la ciudad, a manera de ejemplo, imaginemos que en 1985 llegó una persona de 25 años a residir cualquier municipio de la zona metropolitana de Toluca, para este 2025 tendría estaría alcanzando los 65 años

de edad, por lo que ese importante flujo de inmigrantes a la metrópoli, sin duda explica el acelerado proceso de envejecimiento.

El crecimiento urbano ha traído diversas consecuencias en cuanto a condiciones de vida de la población, una de las más relevantes para este estudio, es la distancia entre las viviendas y la oferta comercial o de servicios necesarios para las personas. Al haber cambios en la estructura de edad, esto traerá modificaciones en las capacidades y requerimientos actuales, así como la preocupación de no contar con las condiciones necesarias para que las personas mayores vivan saludable y activamente en las ciudades (Ham, 2010; Garrocho y Campos, 2016; Narváez-Montoya, 2012). Estos procesos de envejecimiento demográfico y creciente concentración de la población en ciudades han sido retomados en las agendas internacionales como temas prioritarios, por ejemplo, la Agenda 2030 y la Nueva Agenda Urbana que ofrecen iniciativas para atender el envejecimiento demográfico en los países, proponen mejorar la accesibilidad de mujeres, niños, adultos mayores y personas con discapacidad, así como de abordar una planificación sensible a la edad en las ciudades (ONU 2018, pp. 51–53; ONU-Hábitat, 2021). En el caso del país, a nivel federal, existe la Ley General de Movilidad y Seguridad Vial que busca la implementación de políticas, planes y programas en materia de movilidad que debe de favorecer a las personas.

Para el desarrollo de este trabajo, se parte de la base de que existen diversas aproximaciones para abordar el envejecimiento al interior de las ciudades utilizando herramientas de análisis espacial, trabajos que combinan índices demográficos y espaciales para identificar la distribución de la población, sus características y patrones espaciales. Autores como Florencio y Real (2019), Trujillo *et al.* (2022) y Mesillas (2021) proponen índices para evaluar condiciones de equipamiento, infraestructura y del entorno urbano para la población envejecida. Estos estudios previos motivan el análisis de los servicios e infraestructura urbanos y su impacto en la movilidad potencial del adulto mayor en la ciudad de Toluca. Por esta razón el objetivo de este estudio es demostrar los obstáculos que puede enfrentar una persona mayor en la ciudad, para atender sus necesidades.

Fundamentos teóricos y conceptuales

Para este trabajo se analizan cuatro líneas temáticas que permitirán abordar el proceso de envejecimiento y la satisfacción de sus necesidades en las ciudades: primero se aborda el envejecimiento en el lugar y urbanismo gerontológico; segundo, estructura urbana y personas mayores; tercero, relacionado con envejecimiento activo, movilidad potencial y accesibilidad y, por último, teorías del *space syntax*. Con esta recopilación, permite contar una base teórico-conceptual para abordar el tema de los entornos urbanos accesibles y beneficiosos para la población en general y especialmente para la adulta mayor.

Envejecimiento en el lugar y urbanismo gerontológico

La definición de “envejecer en el lugar” se considera como el viaje del individuo para mantener su independencia en el lugar de residencia y participar en comunidad, por lo que envejecer debe observarse como un proceso personal de involucrarse en el espacio, comunidad y conservar su independencia (Rogers *et al.*, 2020, p. 9). Este concepto según Cárdenas (2021), puede explicarse en cuatro dimensiones: el primero se relaciona con los aspectos psicológicos y sociales de los adultos mayores en vivencia del lugar; el segundo desarrolla las percepciones de la población sobre el entorno y sus preferencias de interacciones sociales; el tercero se relaciona con el espacio por distintas escalas y, por último, el estructural se deriva de los elementos de diseño urbanos y disponibilidad de infraestructura, para implementar políticas públicas en temática de vivienda, movilidad y urbanización.

El urbanismo gerontológico tiene como fin adaptar los entornos urbanos ante una población envejecida y vulnerable (Bello, 2013; García-Valdez *et al.*, 2019). Existen tres principales campos de estudio del urbanismo para las personas mayores, el campo cuantitativo donde se analiza la distribución de la población urbana y su relación con procesos urbanos. El segundo trabaja con las percepciones de las personas mayores en las ciudades, analizando su habitabilidad e identidad, así como la vida cotidiana del individuo; por último,

el enfoque propositivo en el diseño urbano y de políticas públicas que coadyuven en el bienestar de las personas mayores (Cárdenas, 2021).

El urbanismo gerontológico es un elemento clave para el análisis de los cambios en grupos de edad y en los elementos urbanos, pues según Cardo (2021) este tipo de urbanismo aborda las temáticas: desplazamiento y transporte, espacios públicos y áreas verdes, equipamiento y servicios y vivienda. Los cuales garantizan la accesibilidad, seguridad y adecuación de los espacios, promoviendo su independencia y bienestar, procurando evitar la existencia de diferencias territoriales a causa del envejecimiento y el enfoque de programas para este sector (Narváez-Montoya, 2012; García-Valdez *et al.*, 2019; Sánchez, 2007). En este sentido, este enfoque será el utilizado en esta investigación orientado al análisis de la estructura urbana que, de acuerdo con Zoido *et al.* (2000) y Ducci (1990), son una serie de elementos físicos destinados a la realización de actividades y son primordiales en la conformación de la ciudad como son las vialidades, equipamientos, infraestructura urbana, áreas verdes y zonificaciones, que se relacionarían con las temáticas de intervención del urbanismo gerontológico.

Estructura urbana y adultos mayores: definiendo las barreras

El desplazamiento de los adultos mayores está condicionado a la estructura urbana; por ejemplo, si prevalecen condiciones desfavorables en el entorno, como banquetas estrechas, automóviles que bloquean las aceras, poca o nula iluminación en la calle generan sentimientos de inseguridad a este grupo de edad (Rivera y González, 2024). Igualmente, el mal diseño o la ausencia de la infraestructura obstaculiza el confort y seguridad del adulto mayor, al no contar con elementos necesarios para este grupo como la existencia áreas verdes y de descanso, sanitarios públicos, señalización clara, aceras sin obstrucciones o transporte público adecuado para personas con sillas de ruedas, así como medidas de seguridad vial (Cortés-Topete y Tavares-Martínez, 2022; Pérez y Viramontes, 2022). Por lo tanto, las recomendaciones para abordar el cambio de las ciudades hacia un enfoque de ciudades amigables con el envejecimiento es la adecuación de banquetas, existencia de rampas, la creación de entornos de tranquilidad, seguridad y de confort térmico, la señalización adecuada para

peatones y cruces seguros (De la Rosa y Castañeda, 2018) ya que además de estas barreras físicas, se encuentran las barreras institucionales, culturales y de integración que la misma sociedad impone a este grupo de población (OMS, 2018). En conjunto, estas barreras limitan su autonomía y restringen su participación en la vida social, afectando su bienestar y calidad de vida.

Casos exitosos de ciudades

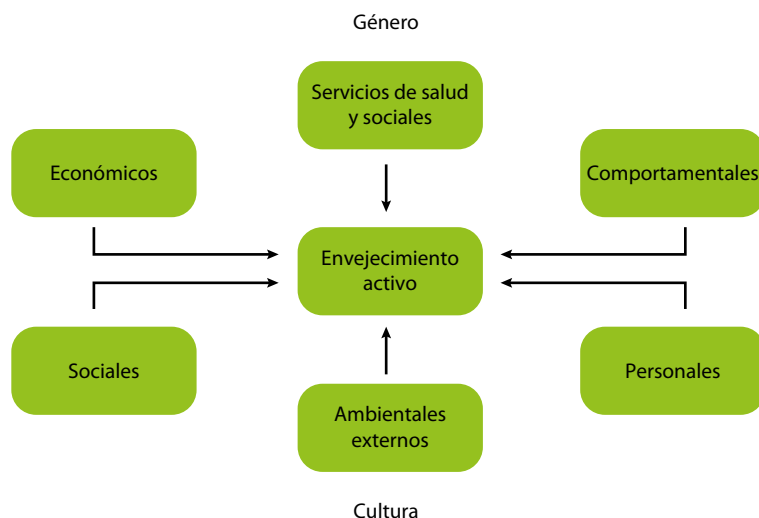
Ante el aumento de personas mayores en los asentamientos humanos, distintas ciudades han abordado planes de acción para ser amigables con este grupo de edad. Se destacan los casos de Nueva York, Estados Unidos; Vancouver, Canadá y Londres, en Inglaterra. De acuerdo con (Garrocho & Campos, 2016) la primera ha desarrollado avances en materia de diseño urbano, normas de construcción, unidades habitacionales, transporte y movilidad, así como asesoría en negocios para atender a personas mayores. El caso de Vancouver se especializa en una fuerte relación entre la sociedad y los gobiernos locales que ha favorecido en la propuesta de más de 60 acciones para ser una ciudad más comprometida para sus adultos mayores. Por último, Londres, comenzó con una fase de investigación apoyada por sus instituciones académicas para el diseño de sus políticas públicas, lo que permitió analizar a la ciudad como un sistema complejo que se basa en interacciones entre las personas, sus hogares, sus actividades y negocios que favorecen en la formación de redes y espacios funcionales; con esto, creó acciones para su propia realidad. Estos casos permiten reflexionar que las ciudades amigables se construyen con base en alianzas de distintos sectores sociales, incorporándose la academia, para la toma de decisiones y atender el bienestar de las personas mayores mediante una participación relevante y activa de los gobiernos en sus diferentes niveles.

Envejecimiento activo

El “envejecimiento activo” se refiere a mejorar la salud, la participación y la seguridad para aumentar la calidad de vida en la vejez (OMS, 2002), por lo

que las políticas derivadas de esta definición buscan que los adultos mayores mantengan su autonomía el mayor tiempo posible (Garrocho y Vilchis, 2021). En la figura 1 se observa los determinantes esenciales para reconocer e implementar políticas enfocadas al envejecimiento activo. No obstante, tal como desarrolla Marzo *et al.* (2023) y OMS, (2002) que si los determinantes transversales de género y cultura no son atendidos, las desigualdades persistirán en este grupo de edad.

Figura 1. Factores del envejecimiento activo



Fuente: OMS (2007).

Movilidad potencial y accesibilidad

En este apartado se define a la movilidad como la acción de trasladarse entre diversos puntos con el fin de realizar una actividad necesaria y cotidiana (Reyes *et al.*, 2019). No obstante, para el adulto mayor, la deficiente infraestructura y las condiciones de los sistemas de movilidad y servicios urbanos generan barreras que aíslan a este grupo de edad, lo cual conlleva

a un aislamiento involuntario y, por ende, afectaciones en la salud de las personas mayores (Cinderby *et al.*, 2018; Garrocho y Vilchis, 2021).

Por otra parte, la accesibilidad es entendida como la oportunidad de desarrollar actividades mediante la realización de viajes eficaces que favorecen la visita al mayor número de lugares posibles en el viaje (Reyes *et al.*, 2019; Miralles-Guasch, 2002). Este concepto está asociado a las actividades económicas, distribución poblacional y la configuración de la red vial, por lo que es fundamental medir la posibilidad de desplazamientos con base en la oferta de espacios e infraestructura para cada tipo de traslados (Pereira y Herszenhut, 2023; Herce, 2009).

Otro aspecto por considerar son las dinámicas y características urbanas que influyen en la movilidad y calidad de vida de los habitantes. De acuerdo con Bazant (2020) se clasifican los espacios urbanos en cinco categorías. La primera son los centros urbanos típicamente coloniales, que concentran actividades administrativas y comerciales, resultando en una alta población flotante.

El siguiente son las colonias céntricas, valorizadas por su accesibilidad, se remodelan para usos mixtos, incrementando también la población flotante. Continúa con los corredores urbanos, con intenso tránsito vehicular y peatonal, albergan numerosos comercios, aunque los vendedores ambulantes pueden obstruir la movilidad. Los pueblos conurbados se transforman en subcentros urbanos debido a la expansión de la ciudad. Finalmente, las colonias consolidadas, conectadas por vialidades principales que soportan una gran carga funcional y acceso a servicios urbanos.

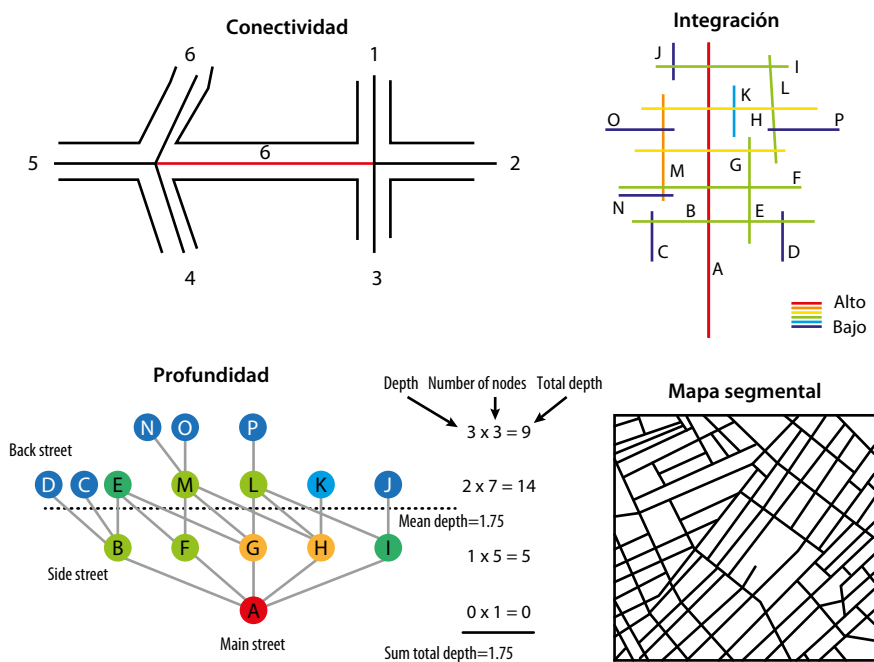
Esta clasificación ayuda a comprender las dinámicas urbanas y su impacto en la movilidad y calidad de vida de los adultos mayores. En este punto es importante de mencionar la clasificación de un sistema vial. Para ello, se retoma la aproximación de Reyes y Cárdenas (2018) que habitualmente se clasifica en tres grupos: primarias, secundarias y locales, cada una tiene un nivel de grado de movilidad y accesibilidad. Por ejemplo, las calles principales favorecen la movilidad en diversos puntos de la ciudad y conectan por vías rápidas o carreteras. Las vialidades secundarias mantienen un equilibrio entre movilidad y accesibilidad, al repartir el tránsito hacia las calles locales y principales. Por último, las calles locales aproximan los viajes hacia residencias o hacia el comercio o la industria.

Teorías del *space syntax*

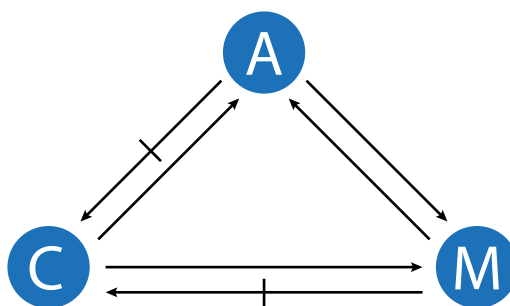
El *space syntax* es un método y a la vez una teoría relacionada con la forma urbana, donde sus aplicaciones son en estudios de diseño urbano y arquitectura, con el fin de comprender la configuración espacial y el desplazamiento de las personas (Koohsari *et al*, 2016). Adicionalmente, la teoría está basada en los principios espaciales sobre qué tan céntrico es un elemento en un espacio definido, su extensión, las relaciones de vecindad y densidad (Yamu *et al.*, 2021).

Entre los conceptos fundamentales del *space syntax*, según Paranaiba (2018) se encuentran la **conectividad**, que mide el número de conexiones que tiene una calle con sus calles vecinas; en otras palabras, la conectividad facilita el desplazamiento a lo largo y ancho de una ciudad. La **integración** es la accesibilidad de una calle con respecto a las demás; mientras que la **profundidad** hace referencia a cuántas calles hay que atravesar para llegar al destino determinado; la **elección angular** hace referencia a la accesibilidad de las calles considerando su angularidad, es decir, cuántas veces se hace un cambio sustantivo de dirección para llegar a un destino; por último, el **mapa segmental** que es una representación de la red vial mediante nodos y segmentos conectados. En la figura 2 se puede observar un ejemplo de estos conceptos de la sintaxis espacial. Otro concepto importante es el **radii** que es un atributo que nos permite medir la red vial bajo criterios de topología, geometría y distancia. Para este estudio, se destaca el **radii métrico** que mide la integración de una línea según su conexión con otras dentro de una distancia específica en la red (similar a lo que sería un área de influencia establecida a partir de la red vial).

Una teoría relevante de la sintaxis del espacio es el del movimiento natural. Las nociones básicas de esta teoría se ejemplifican en la figura, 3 que demuestra las conexiones entre la configuración espacial (C) los puntos atractivos (A) y los desplazamientos (M). Según Hillier *et al.* (1993) las atracciones puntuales y los movimientos influyen mutuamente entre sí, a mayor presentación de sitios atractivos mayor son los movimientos. Estos dos elementos influyen en la configuración espacial. Por el contrario, la morfología urbana influye en la ubicación de las actividades y, por lo tanto, en los desplazamientos.

Figura 2. *Conceptos principales del space syntax*

Fuente: van Nes y Yamu (2021).

Figura 3. *Triada de la configuración, atractores y movimiento*

Fuente: Hillier *et al.*, 1993.

Metodología para el análisis del envejecimiento y el entorno urbano

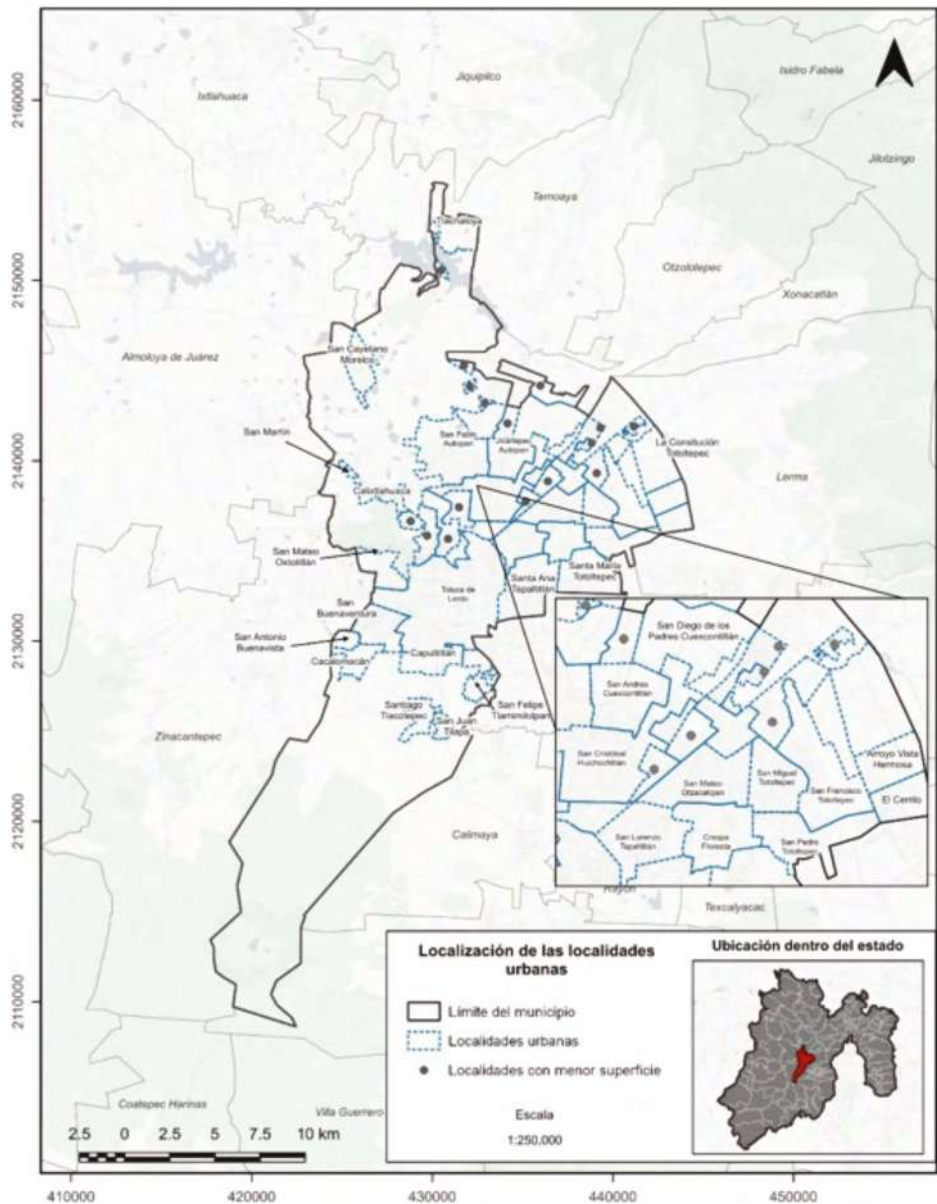
El alcance de esta investigación es cuantitativo, por lo que se obtienen datos socioeconómicos para describir y explicar la movilidad de las personas mayores y estructura urbana. Para esto, esta investigación consideró a 7,910 manzanas urbanas como universo, ubicadas en 51 localidades urbanas del municipio de Toluca, las cuales se observan en la figura 4, las que están representadas puntualmente son las que tienen una menor superficie. Por ejemplo, las que están cercanas a Toluca de Lerdo corresponden a Santiago Tlaxomulco y Santa Cruz Azcapotzaltongo, al norte de estas dos se sitúan las localidades de San Marcos Yachihuacaltepec (el cual colinda con Calixtlahuaca) y Santiago Miltepec.

Los lineamientos de este estudio son el análisis espacial, entendido como el conjunto de técnicas y modelos con los que es posible explotar los datos espaciales (Olaya, 2020). Por ello, se retoman los principios que Buzai y Montes (2021) establecen como asociados a la ciencia geográfica: localización, distribución espacial, asociación espacial, interacción espacial, evolución espacial y globalidad territorial. Tomando en cuenta estos principios es posible el análisis de la vejez y el entorno urbano.

Para analizar datos demográficos se consideró como población adulta mayor a las personas de 60 años o más. La organización de este estudio consiste en cuatro fases, en cada una se procesa diversos datos censales o espaciales para un análisis de los entornos urbanos y la población objetivo. En general, los softwares utilizados para el procesamiento de datos fueron SPSS 21, Excel y el software de sistema de información geográfica Qgis 3.28. Las actividades de cada fase se explican a continuación.

Fase 1. Condiciones sociodemográficas y espaciales

En esta fase la principal fuente de información fueron los censos poblacionales de los años 2010 y 2020, así como de la encuesta intercensal 2015 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Con estos datos, se

Figura 4. Localización de localidades urbanas del municipio de Toluca, 2020

Nota: Mapa base de CartoDB. Fuente: elaboración propia con base en Marco Geoestadístico, INEGI (2020).

obtuvieron las condiciones sociodemográficas de la población adulta mayor, tasas de crecimiento e índices demográficos. Este último insumo, se obtuvo de acuerdo con la información de Huenchan (2021) que se integra en el documento “*Indicadores sobre envejecimiento y personas mayores en Centroamérica, México y el Caribe hispano*”. Con esta revisión, los índices aplicados fueron el índice de envejecimiento, envejecimiento interno y razón de dependencia.

- Índice de envejecimiento: mide la cantidad de población de 60 años y más, por cada 100 menores de 14 años.
- Razón de dependencia demográfica: calcula la población mayor de 65 años, por cada 100 personas de 20 a 64 años.
- Índice de envejecimiento interno: representa la proporción de personas de 80 años y más, con respecto a las de 60 años y más.

Para calcular la tasa de crecimiento poblacional se utilizó la siguiente fórmula:

$$r = \frac{\ln \frac{P_1}{P_0}}{t} * 100$$

donde:

- $\ln \frac{P_1}{P_0}$ = Logaritmo natural de la población final entre la población inicial.
- $|t|$ = tiempo intercensal, tomando en cuenta el día medio del levantamiento de la información.

Para identificar espacialmente las manzanas que cuentan una mayor cantidad de adultos mayores se realizó la solicitud de información a INEGI. Con los datos obtenidos, se calcularon el índice de envejecimiento y envejecimiento interno. Una vez hechos estos indicadores se estratificaron por el método de Dalenius y Hodges, que consiste en estandarizar los datos para minimizar la varianza de cada estrato. Para llevarlo a cabo, se siguió el procedimiento que establece INEGI (2010) y Campos (2009). El resultado fue la obtención

de tres estratos para el índice de envejecimiento y cinco para el envejecimiento interno. Cabe mencionar que se eliminaron los casos que no incluían ningún grupo de población considerada para el índice por lo que, se observó una diferencia de valores perdidos; es así como para el índice de envejecimiento se contaron con 4 619 valores válidos y envejecimiento interno con 1 136. Es por ello que en la visualización cartográfica existen áreas sin resultados, pero que son referentes de las zonas donde se localizan.

Fase 2. Entorno amigable para la población adulta mayor. Determinación de las barreras

El análisis del entorno amigable que facilite la movilidad de los adultos mayores consistió en la selección de variables a partir de la revisión en el apartado teórico de este trabajo, que describen los requerimientos urbanos apropiados para el adulto mayor. Una vez identificadas las variables para el grupo de edad, se seleccionaron las correspondientes a la documentación de *Características del Entorno Urbano* de INEGI (2021) para la elaboración del producto cartográfico. Además de añadir variables que la propia documentación integra y que se valoraron como apropiadas para el modelo (tabla 1).

Tabla 1. Variables del índice del entorno amigable para la población adulta mayor

Grupo	Número	Indicador
Confort, seguridad y accesibilidad	1	Número de vialidades con pavimento o concreto
	2	Número de vialidades con banquetas
	3	Número de vialidades con árboles o palmeras
	4	Número de vialidades con alumbrado público
	5	Número de vialidades con rampa para silla de ruedas
Señalización vertical y horizontal	6	Número de vialidades con paso peatonal
	7	Número de vialidades con letrero con nombre de la calle
	8	Número de vialidades con parada de transporte colectivo
Movilidad segura y accesibilidad	9	Número de vialidades sin teléfono público
	10	Número de vialidades sin puesto semifijo
	11	Número de vialidades sin restricción del paso a peatones
	12	Número de vialidades sin puesto ambulante
	13	Número de vialidades con transporte colectivo

Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2021).

Después, se realizó la estandarización de los indicadores para el índice sintético por el método de componentes principales (PCA por sus siglas en inglés). Según Buzai (2015) el PCA facilita la extracción y simplificación de variables al reducir la dimensionalidad del problema, lo que puede presentarse como una síntesis de la distribución espacial. Al calibrar el modelo, a partir del segundo componente, la varianza total explicada de éste es del 52%, por lo que se considera válido el modelo, además que contiene una carga importante de elementos para personas mayores, como restricciones a peatones, puestos comerciales, banqueta y pavimentación. Posteriormente, con el método de Dalenius y Hodge se obtuvieron cinco estratos que se clasificaron como valores de muy baja a muy alta amigabilidad del entorno.

Después de estimar el índice “resumen de calidad del entorno urbano”, se realizó un análisis de autocorrelación espacial aplicando el índice de Moran. Según Buzai y Montes, (2021) este análisis indica que existe una relación del espacio geográfico, pero los lugares con mayor cercanía tienen relaciones más fuertes por lo que podemos esperar tres resultados según los autores: 1) una similitud cuando las unidades espaciales tienen valores similares y obtenemos una agrupación espacial positiva 2) una disimilitud cuando los valores son diferentes, en este caso se observará una autocorrelación negativa y 3) una aleatoriedad cuando exista una autocorrelación espacial observable. Para aplicar el índice de Moran univariante se utilizó el *software GeoDa 1.22*. Los resultados incluyeron el diagrama de dispersión de la variable y los mapas LISA (Local Indicators of Spatial Association) y valores de significancia.

Fase 3. Determinación de la accesibilidad potencial a servicios urbanos para el adulto mayor

En esta sección se demuestra cómo se elaboró el índice de accesibilidad potencial, a partir de cuatro servicios que se consideraron apropiados para el grupo de edad, estos son los servicios urbanos de abastecimiento, de salud, financiero y parques urbanos. Para esto, se aplicó el modelo de accesibilidad potencial utilizado en Campos-Alanís *et al.* (2020).

$$Acc = \sum_{i=1}^j \frac{I_j}{\frac{Pob_{UP}}{dij^b}}$$

Donde:

- Acc = Indicador de accesibilidad potencial
- I_j = Atractividad de las unidades de servicio
- Pob_{UP} = Población que es usuaria potencial de los servicios, en este caso, el total de las personas de 60 años o más del municipio
- d_{ij} = Distancia lineal entre el centroe de cada manzana i , considerada como los lugares origen de la población usuaria y, como destino, las unidades del servicio j
- b = Parámetro que refleja la sensibilidad de los usuarios ante cambios de los costos de transporte

Previamente aplicar la fórmula, se obtuvieron de manera puntual los centroides por manzana y el de los servicios. Una vez obtenidos los datos puntuales se generó una matriz de distancias lineales estándar de cada centroe hacia la localización del servicio con el *software* QGIS. Después se trabajó la matriz en una hoja de Excel para realizar las operaciones del índice. Los resultados obtenidos fueron la accesibilidad por manzana o “calidad urbana” y al del servicio como “desempeño urbano”, que retoma la conceptualización de Campos-Alanís *et al.* (2020).

En la tabla 2 se representan las categorías de servicios urbanos elaborados para el índice de accesibilidad potencial, así como fuentes de información y atractividad del servicio. En resumen, las fuentes secundarias consultadas son el Catálogo de Clave Única de Establecimientos de Salud (CLUES) para el año 2022, el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del año 2023 y el Plan Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU) del año 2018 del municipio. En el caso de los mercados se realizó la búsqueda de los mercados o tianguis fijos y central de abastos en el municipio. La atractividad en cada servicio fue distinta, de acuerdo con su capacidad de atención: por ejemplo, en los de la salud se consideró el número de consultorios y los turnos de atención, este último siguiendo

la norma de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) para los centros de salud.

En el caso de supermercados y tiendas al mayoreo se utilizó el número promedio de personal ocupado. Con respecto a los mercados se consideró un factor de atractividad la superficie total de la edificación. Esta misma premisa fue aplicada para el servicio de parques urbanos; en este punto, se decidió realizar el índice de parques exclusivamente de los más representativos para la ciudad, donde se incluyen el Parque Sierra Morelos, Parque Metropolitano Bicentenario y Alameda Central.

Tabla 2. Fuentes y atractividad de servicios urbanos para el índice de accesibilidad

Servicio	Categoría	Atractividad	Fuente de información
Salud	Salud de primer nivel público	Turnos de atención	CLUES, 2022
	Salud de primer nivel privado	Turnos de atención	CLUES, 2022
	Farmacias	Promedio de personal	DENUE, 2023
Abastecimiento	Mercados públicos y central de abastos	Superficie construida	Digitalización de áreas de abastecimiento en el municipio.
	Supermercados y tiendas al mayoreo	Promedio de personal ocupado	DENUE, 2023
Financieros	Unidades referentes banca múltiple, cajas de ahorro, montepíos y unidades de crédito	Promedio de personal ocupado	DENUE, 2023
Parques	Parques populares del municipio	Superficie construida	PMDU, 2018

Fuente: elaboración propia.

Se aplicó el índice sintético de accesibilidad potencial al sistema de servicios que conjunta las siete variables de accesibilidad potencial de cada sistema de servicios. Nuevamente, con el método de PCA, la varianza a partir del segundo componente es de 74.7% siendo un valor factible para el indicador. Una vez aprobado el modelo se aplicó el método de valor índice medio para la clasificación de los datos. Este método es propuesto García De León (1989) y es de utilidad para identificar la semejanza entre unidades espaciales para formar subconjuntos.

Fase 4. *space syntax*

En esta última fase se desarrollaron los índices del *Space syntax*, específicamente *choice* e *integration*. Primero, se obtuvo la red vial de *Open Street Map* del año 2023 y se realizó una limpieza topológica de esta con el *software ArcGIS 10.8*. Después de validarse la topología, se importó la información al *software DepthmapX 0.8* donde se realizó un análisis segmental considerando un radio de n para calcular la distancia métrica total de la red.

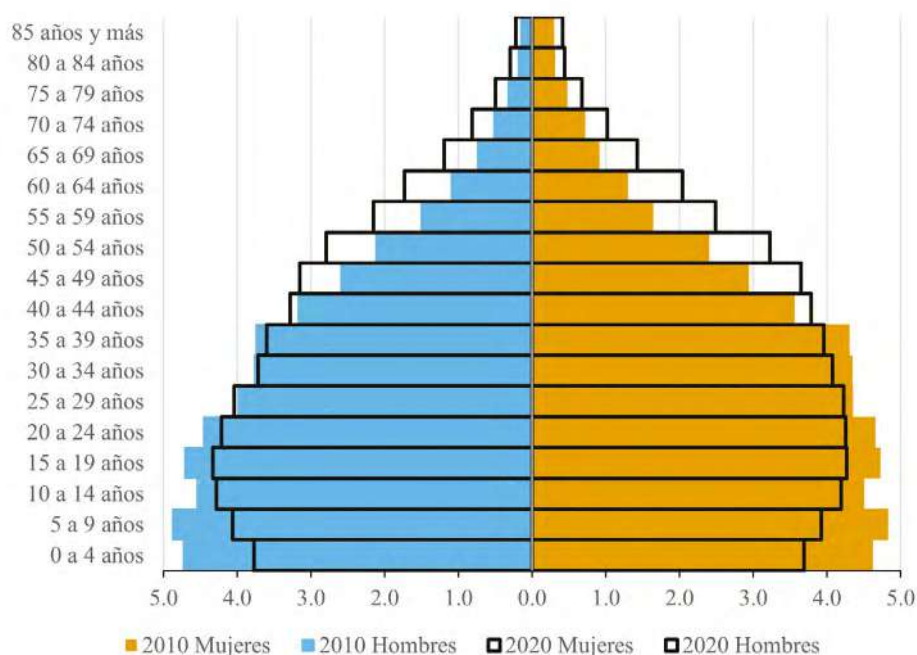
Contexto demográfico del entorno urbano

En este apartado se hace una ajustada revisión de la participación porcentual que tiene la población adulta mayor, con respecto a la población total del municipio. Para 2010, el municipio de Toluca registró una población de 819 561 y que pasó a 910 608 en el 2020. En cuanto a la población de 60 y más años, en el 2010 se registraron 57 691 personas de este grupo de edad. Una década más tarde esta cifra ascendió a 98 137 personas. Al estimar la tasa de crecimiento medio anual del periodo censal 2010-2020, se identifica que el municipio registró un ritmo de crecimiento bajo del 0.83%; en contraste, el subgrupo de adultos mayores para el mismo periodo registró un ritmo de crecimiento de 5.05% anual. En otras palabras, el grupo de personas mayores aumenta su ritmo de crecimiento 6 veces más rápido que la población total del municipio. Al calcular el tiempo de duplicación de la población mayor, se espera que para el 2034 los adultos mayores representen el doble de lo registrado en el 2020.

En cuanto a la estructura de la población, la pirámide demográfica por grupos quinquenales y sexo (figura 5), muestra la transición hacia el envejecimiento demográfico del municipio de Toluca. En ella se observa una clara reducción de población entre los grupos de 0 a 24 años en la década al representar del 46.7% al 41% de la población total. En contraste, la participación porcentual de los adultos mayores pasó del 7.0 al 10.8% en el mismo periodo. Se puede establecer visualmente, la notoria transición demográfica hacia el envejecimiento, pues aumenta la participación de los grupos de edad madura y adultos mayores, mientras que se reducen los

grupos quinquenales de la base de la pirámide, que se transforma de una pirámide progresiva a una estacionaria.

Figura 5. Pirámides poblacionales por sexo y grupos quinquenales de edad del municipio de Toluca, 2010 y 2020



Fuente: elaboración propia con base en el Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2010), y el Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2020).

En la tabla 3 se presentan algunos indicadores demográficos sobre los adultos mayores. El índice de envejecimiento en el 2010 fue de 25 adultos mayores por cada 100 jóvenes, para el 2020 esta cifra aumentó significativamente a 45.1 por cada 100 jóvenes. Para el caso de la razón de dependencia demográfica, se observa el aumento de 8.3 personas dependientes por cada 100 en edades productivas a 11.6, cifra que se explica principalmente por el incremento de los adultos mayores más que por la población infantil. Finalmente, el envejecimiento interno indica que no hay una variación significativa entre los dos periodos. Para el primer año cerca de 14 personas

eran mayores de 80 años, mientras que una década después esta cifra se reduce levemente para registrar cerca de 13 personas. Lo mismo sucede con la población de mujeres del municipio, mientras que la de hombres se mantiene constante. En resumen, los datos generales muestran que la población municipal ha envejecido significativamente en el periodo analizado. Al haber un mayor número de población envejecida y dependiente, se requerirán de políticas orientadas en atender sus necesidades salud, cuidado y pensión.

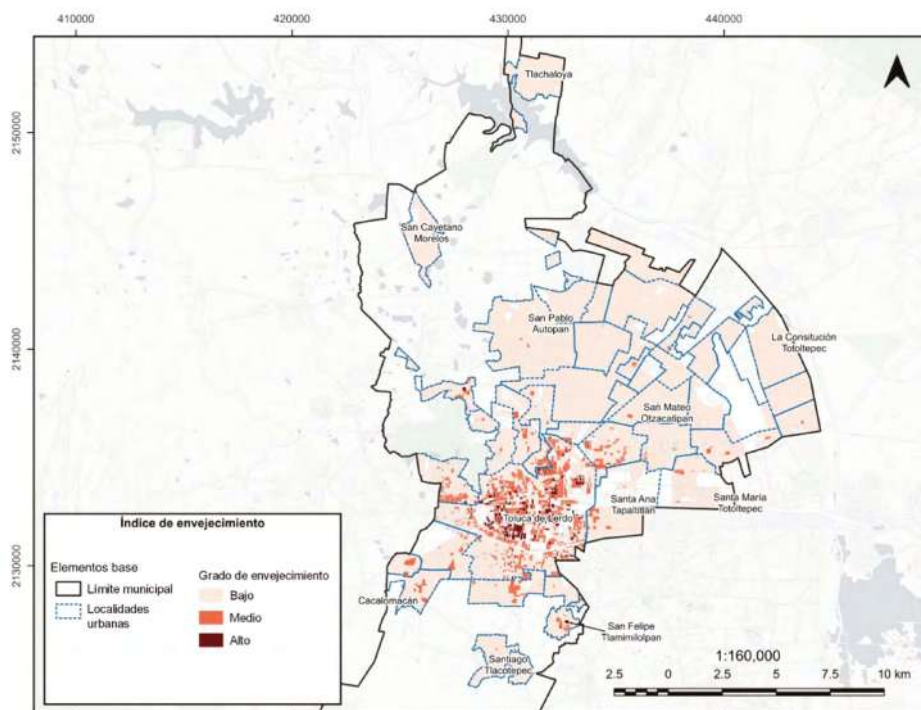
Tabla 3. *Índices demográficos sobre el envejecimiento*

<i>Índices</i>	<i>2010</i>			<i>2020</i>		
	<i>Total</i>	<i>Hombres</i>	<i>Mujeres</i>	<i>Total</i>	<i>Hombres</i>	<i>Mujeres</i>
Envejecimiento	25.0	10.8	14.3	45.1	19.9	25.1
Razón de dependencia	8.3	3.4	4.9	11.6	5.0	6.6
Envejecimiento interno	13.5	4.8	8.7	12.7	4.9	7.9

Fuente: elaboración propia con base en el Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2010), y el Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2020).

En la figura 6 se muestra el índice de envejecimiento por manzana, en la cual se revela una concentración de población en edad avanzada en Toluca de Lerdo, colindando con las vialidades de Paseo Tollocan y Paseo Matlazinca y que disminuye conforme se aleja a las periferias. Estas vialidades, en los inicios del crecimiento urbano marcaba el límite de la ciudad, ahora tienen un carácter de circulación interurbana y comunicador de carreteras (Hoyos-Castillo y Camacho-Ramírez, 2010). Al norte se encuentra una menor cantidad de zonas envejecidas. Al disminuir la escala se observa que el envejecimiento se ha dado alrededor de los ejes estructurantes como Paseo Colón, vía que fue un eje de expansión al sur de la ciudad (Liévanos, 2016).

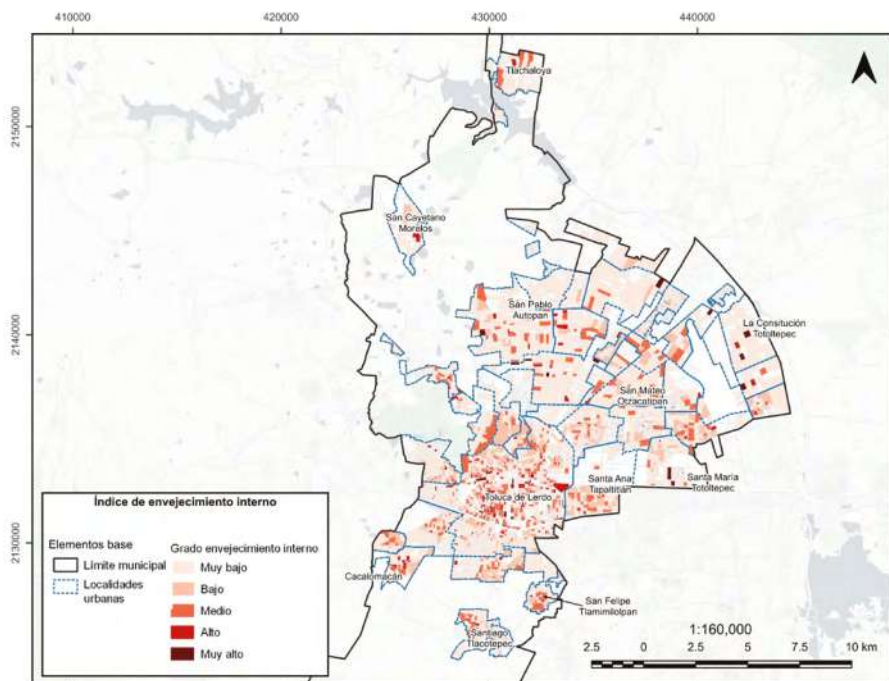
Para el índice de envejecimiento interno, se toma como ejemplo la localidad de Santa Ana Tlapaltitlán (véase figura 6 y 7 de esta zona). Al visualizar el índice de envejecimiento nos indica que es un área que está rejuveneciendo ya que, al tener un nivel bajo de adultos mayores nos demuestra que existe una mayor cantidad de jóvenes y en edad productiva en la localidad. Ahora bien, el envejecimiento interno nos señala que se mantiene una concentración en el centro de la localidad con población mayor a 80 años. En la localidad analizada prevalecen valores medios, es decir que las personas mayores habitantes de esta demarcación tienen una edad

Figura 6. Índice de envejecimiento de las localidades urbanas de Toluca, 2020

Nota: Mapa base de CartoDB. Fuente: elaboración propia con base en información proporcionada por INEGI.

superior a los 80 años, lo que aporta información relevante para implementar políticas más adecuadas al grupo de edad.

Las figuras del envejecimiento y el envejecimiento interno nos señalan que los valores altos siguen el patrón del proceso histórico de expansión urbana de Toluca. En la zona sur hay una mayor agrupación de envejecimiento interno en comparación con la zona norte. Esto se debe principalmente a que, en la época de la industrialización de la ciudad, la instalación de la industria sobre el corredor Toluca-Lerma influyó en la localización de colonias obreras en las colindancias del mismo.

Figura 7. Envejecimiento interno por manzana, 2020

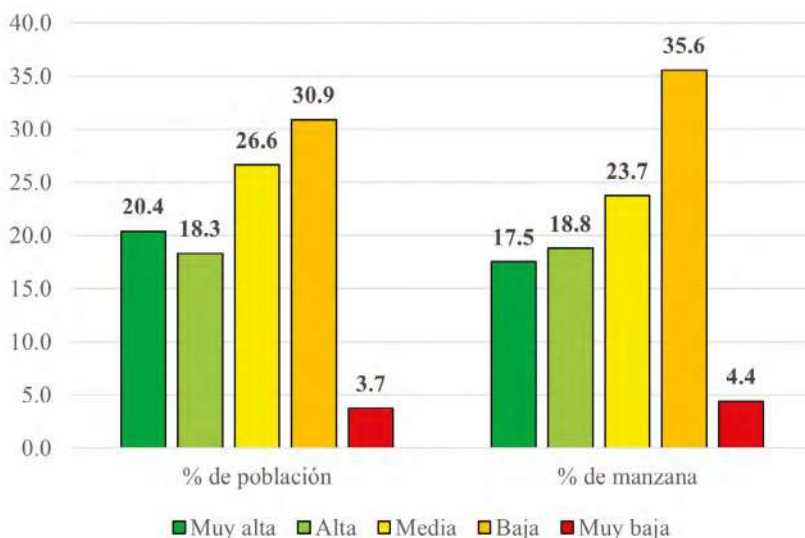
Nota: Mapa base de CartoDB. Fuente: elaboración propia con base en información proporcionada por INEGI.

Condiciones del entorno urbano para el adulto mayor

Por otro lado, al analizar la información para la determinación del entorno amigable para los adultos mayores, se revelan patrones interesantes que revelan las barreras y facilidades. Algunos hallazgos se observan en la figura 8, donde el 40% de las manzanas se encuentran en condiciones hostiles para el grupo de edad, esto afecta a uno de cada tres personas mayores. El porcentaje de población residente en condiciones medias es del 26.6%, donde el 23.7% de las manzanas tienen este grado de amigabilidad. Es interesante observar que un poco menos del 40% de las personas mayores residan en manzanas con condiciones muy alta y altamente favorables, lo que representa que existe una gran proporción de adultos mayores a los cuales se pueden beneficiar con sólo mejorar las condiciones de su

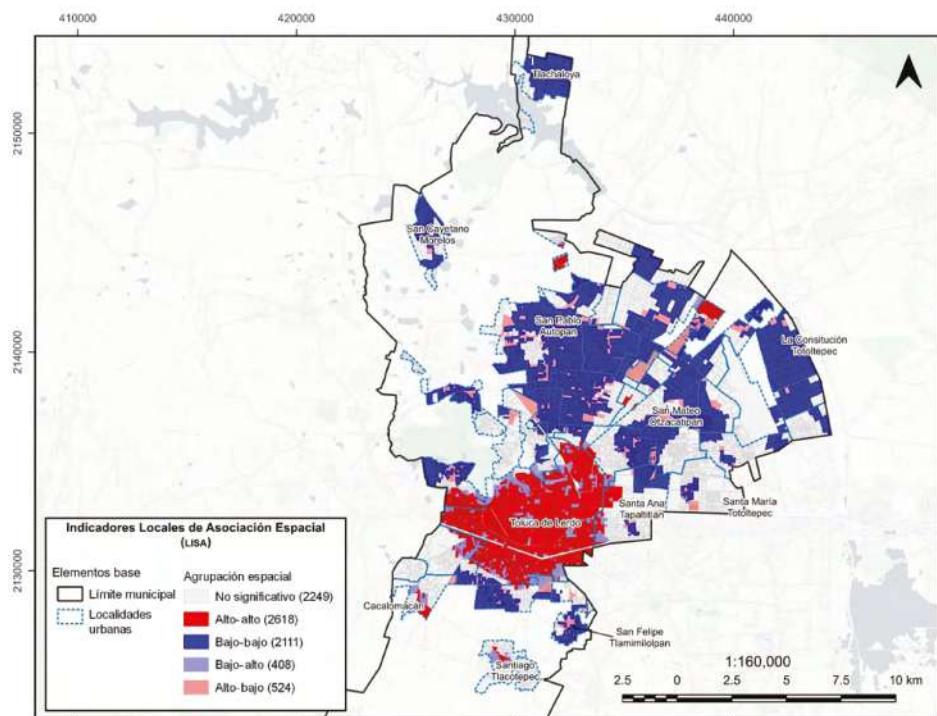
entorno, lo que se convierte en un área de oportunidad de la planeación urbana local.

Figura 8. Porcentaje de manzanas por grado del entorno amigable



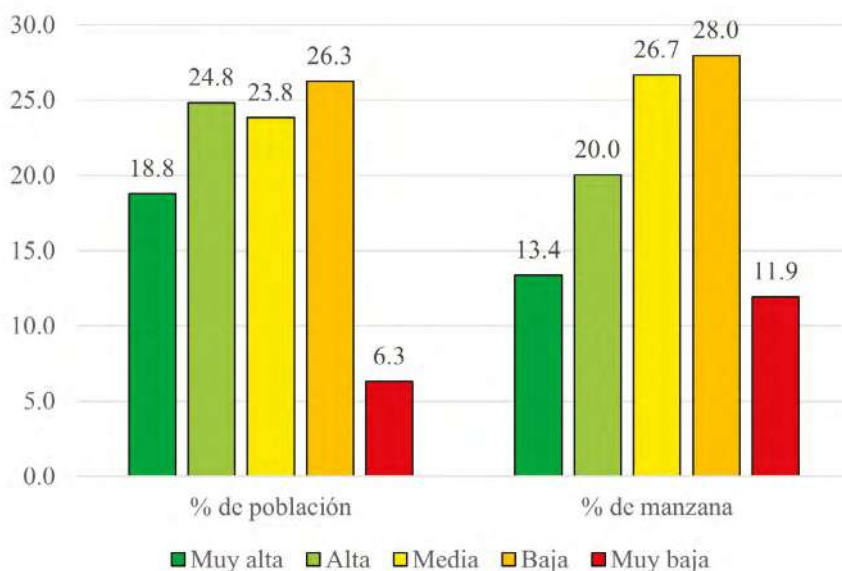
Fuente: elaboración propia con base en información del INEGI (2020).

En la figura 9 se observa el comportamiento espacial del índice del entorno amigable. Las zonas de excelentes condiciones están presentes principalmente en la localidad de Toluca de Lerdo, de manera dispersa fuera del área delimitada por el Paseo Tollocan-Matlazincas. En contraste, localidades del norte del municipio como San Pablo Autopan, San Mateo Oztacatipan, Tlachaloya, La Constitución Totoltepec, San Cayetano, así como algunas porciones importantes en el municipio en la localidad de San Buenaventura son las que tiene condiciones de muy baja y baja amigabilidad. La imagen es muy evidente la prevalencia de una zona central donde se tienen las mejores condiciones de amigabilidad y una periferia donde persisten las desventajas de este indicador de entorno, con excepciones puntuales. Si bien la figura nos permite observar y analizar las condiciones del entorno, se aplicó la autocorrelación espacial para resaltar las áreas con mayores similitudes o diferencias de ese indicador.

Figura 10. Indicador de Autocorrelación Espacial Local de Moran

Nota: índice LISA elaborado con el software GeoDA, considerando valores del índice resumen del entorno amigable. Fuente: elaboración propia.

Las zonas con mayor amigabilidad del entorno se sitúan en Toluca de Lerdo, esta área al ser el centro de la ciudad suele recibir mayor inversión en infraestructura para facilitar los desplazamientos y el acceso a servicios urbanos. La constante atención y desarrollo en estas áreas favorecen la creación de entornos más amigables para la población flotante y residente de la zona. En contraste, las áreas con menos amigables se presentan en las localidades periféricas donde la infraestructura no ha sido priorizada. Los valores intermedios clasificados como “alto-bajo” en su mayoría, se tratan de fraccionamientos, donde es común observar que en el interior de estas urbanizaciones, se cuentan con los servicios suficientes, contrastando con el exterior, donde disminuyen estas condiciones.

Figura 11. Porcentajes de población y manzanas del índice de accesibilidad potencial

Fuente: elaboración propia con base en información del INEGI (2020).

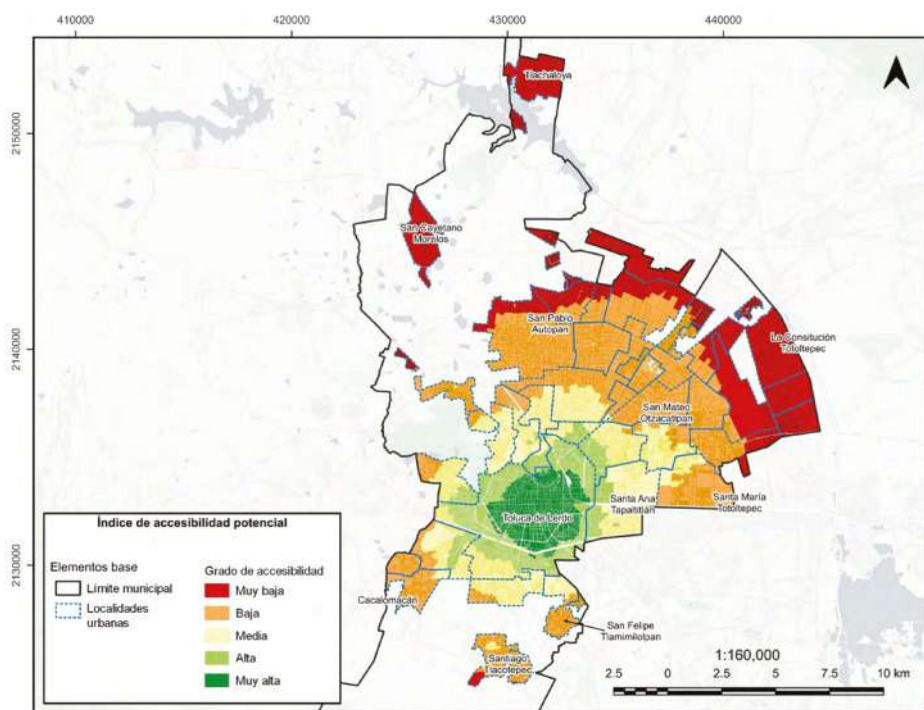
En conclusión, la autocorrelación espacial del índice del entorno amigable ofrece una comprensión más profunda de cómo la accesibilidad y el flujo de personas influyen en la calidad del entorno urbano. Este tipo de análisis es recomendable para orientar futuras intervenciones urbanas, que busquen equilibrar las condiciones del entorno amigable a través de la ciudad, en especial en áreas que actualmente están menos favorecidas.

En lo relativo al análisis de accesibilidad a servicios clave para la población mayor, la figura 11 nos demuestra que una de cada tres personas habita áreas de baja accesibilidad a los satisfactores seleccionados previamente. A manera de ejemplo, las zonas de alta inaccesibilidad cuentan con 1.51m² de áreas verdes por habitante, muy por debajo del estándar de la OMS de 9 m². En este caso, el 40% de las manzanas de la zona urbana se pueden considerar inaccesibles; mientras que el 33.4% presenta una excelente condición de servicios urbanos. Anteriormente se ha mencionado que el entorno urbano ha tenido mejores condiciones en el casco central de la ciudad, por el acceso a servicios y dotación de equipamiento presentes en la zona. Con la

figura 12 se verifica la información, Toluca de Lerdo es un área accesible y que este grado de accesibilidad disminuye hacia las periferias urbanas.

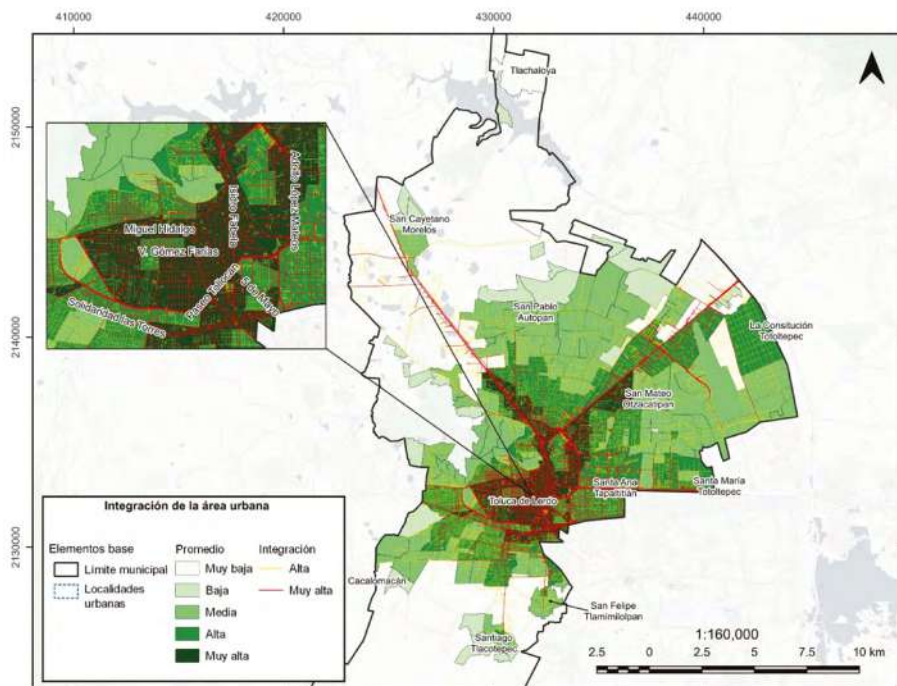
En resumen, el índice de accesibilidad demuestra que la ciudad de Toluca en un patrón claramente de centro-periferia en cuanto a oferta de actividades, servicios y equipamientos (Véase figura 14). Por lo tanto, los lugares a los cuales las personas mayores tendrán que recurrir son en estas áreas. Esto indica, que los subcentros urbanos de la ciudad no cuentan con todas las características necesarias para aproximar los servicios urbanos a distintas localidades.

Figura 12. Índice resumen de accesibilidad al sistema de servicios urbanos, 2020



Nota: mapa base de CartoDB. Fuente: elaboración propia con base en información del INEGI (2020).

Desde el punto de vista de la estructura urbana y como se señaló al inicio del capítulo, se utilizó el enfoque de análisis *space syntax* que permite a partir de la configuración de la red vial de la ciudad, determinar el nivel, de

Figura 13. Integración de la zona urbana de Toluca, 2020

Nota: clasificación por cortes naturales. Para mayor legibilidad de la información se clasificó de muy bajo a muy alto la información. Fuente: elaboración propia.

integración y conectividad de ésta. En este sentido, el análisis de integración de Toluca muestra que las vialidades del centro de la ciudad, como Paseo Tollocan, Isidro Fabela y Miguel Hidalgo, son las de mayor conectividad, es decir, son las que hacen más accesibles los desplazamientos al interior de la ciudad con respecto a todo el sistema, pero también propensas a la saturación en horas punta. En la figura 13, las zonas con verde más intenso son las más beneficiadas en este indicador, mientras que aquellas con una menor intensidad serían las zonas de menor integración. De esta forma, la red de calles conecta el centro de la ciudad a distintos puntos de las periferias urbanas; no obstante, áreas como Tlachaloya, más alejadas del centro, presentan muy baja integración por la ausencia de conexiones directas a la localidad.

Como recomendación, es importante que en estas vialidades se realicen estudios constantemente de sus condiciones para eficientar los tiempos de

secundarias, como Valentín Gómez Farías, que distribuyen el tránsito hacia las calles locales. Las zonas centrales tienen un mayor grado de elección, lo que indica que son preferidas para rutas cortas y rectas, por lo tanto, hay mayor saturación de tránsito. En cambio, las áreas con menor elección tienen menos conectividad y dependen de pocas vialidades principales, lo que podría requerir mejoras en la infraestructura vial para aumentar la accesibilidad (figura 14).

Conclusiones

El envejecimiento es el tema demográfico más importante de nuestro país, por lo que es urgente dar atención a los problemas que afectan la vida cotidiana de poco más de 1 de cada 10 mexicanos. Las políticas actuales orientadas a la atención de los adultos mayores deben trascender a las simples transferencias monetarias que aligeran y apoyan a la atención de las necesidades, no abonan a los retos como el simple hecho de buscar abastecerse, asistir a una consulta médica, cobrar una pensión, desplazarse por la ciudad con seguridad, por citar algunos ejemplos. La identificación de zonas de residencia de los adultos mayores y las condiciones relativas de vida son fundamentales para establecer acciones graduales que aseguren el bienestar de este grupo y de toda la población.

Los hallazgos de este trabajo se pueden resumir en la identificación de barreras urbanas que pueden afectar a los adultos mayores, referentes a las condiciones de la infraestructura urbana y la concentración de bienes y servicios en ciertas partes de la ciudad y que se traduce en la inaccesibilidad a los mismos. En este caso se devela una condición de mayores desventajas para los adultos mayores que residen en las zonas periféricas de la ciudad donde se conjunta la menor dotación de bienes y servicios demandados por este grupo de población, aunado a la configuración del sistema vial que refuerza el esquema monofuncional de la ciudad, de tal suerte que uno de cada 3 adultos mayores habita en condiciones desfavorables de accesibilidad y de falta de infraestructura que facilite su movilidad; por lo tanto, se puede establecer que el objetivo planteado al inicio se cumple satisfactoriamente.

Los resultados generados en la investigación son contundentes: de las 7 910 manzanas analizadas, 1 872 presentan condiciones poco amigables para el adulto mayor y con muy bajos y bajos niveles de accesibilidad a los servicios seleccionados. Por el nivel de desagregación de la información, fue posible la identificación de zonas muy específicas que pueden ser la base de una agenda de intervención urbana muy focalizada para mejorar las condiciones de vida de este grupo de población; de esta forma, se pudo determinar que la localidad más afectada es San Pablo Autopan (al norte del municipio), donde el 12.8% de sus islas urbanas y el 15.3% de su población adulta mayor enfrentan estas condiciones; le sigue San Cristóbal Huichochitlán (localidad vecina de San Pablo), con un 4.5% de sus unidades urbanas afectadas y un 7.9% de su población mayor en esta situación; en tercer lugar, San Miguel Totoltepec presenta un 5.3% de bloques problemáticos, impactando al 6.9% de su población adulta mayor. Estos datos evidencian una fuerte desigualdad en la accesibilidad y calidad del entorno urbano para este grupo etario, por lo que residir en una zona específica de la ciudad, puede ser sinónimo de disfrutar una mayor o menor calidad de vida. En resumen, los índices del entorno amigable y accesibilidad propuestos en esta investigación nos arrojan resultados reveladores en la deficiencia de elementos urbanos e infraestructura que podría facilitar el desplazamiento de las personas mayores y que en la práctica identifican esas barreras que impone en entorno a este grupo de la población.

Ahora bien, para revertir los desafíos que traen consigo la inequidad de los entornos urbanos, se debe tomar en cuenta su complejidad. Bazant (2020) establece que, a causa del crecimiento urbano, las características urbanas implican una diferencia entre sí, cada asentamiento tiene una conectividad y movilidad diferente, por lo que las políticas urbanas que se deriven de este tipo de estudios deben de tomar en cuenta las particularidades del entorno, así como de un amplio consenso de la población residente para garantizar su éxito. Sin embargo, factores como los altos costos de implementación de proyectos masivos, las demandas ciudadanas en otras temáticas y los intereses políticos pueden dificultar la puesta en marcha de iniciativas para ciudades amigables con los adultos mayores. A pesar de ello, los estudios de caso previamente referenciados demuestran que es posible avanzar en esta temática cuando se fomenta la participación de diversos

sectores —incluyendo la academia y la sociedad civil— y cuando se diseñan estrategias adaptadas a las condiciones específicas de cada ciudad. En nuestro país ya existen ejemplos como Guadalajara, Aguascalientes, Tulum y Cancún que han instrumentado acciones de adaptación a la infraestructura urbana, así como acuerdos con prestadores de servicios y con la sociedad en general, tendientes a apoyar las necesidades de este creciente grupo de población, de estos ejemplos se tiene mucha información para aprender de sus experiencias (INAPAM, 2019).

Con relación a los fundamentos teóricos que se integran como innovación en este campo y que provienen del *Space Syntax*, los aportes de Hillier *et al.* (1993) sobre los movimientos naturales son observables para el caso de Toluca. Tras analizar la integración y elección angular del sistema vial, la configuración espacial interviene en la movilidad y la atractividad en ciertas partes de la zona urbana. De esta forma, la zona centro de la ciudad reporta una mejor conectividad, al igual que las posibilidades de elección de desplazamientos para llegar a distintos puntos de la ciudad. De igual forma que con el entorno y la accesibilidad, es posible identificar zonas de intervención tendientes a facilitar los desplazamientos dentro de la ciudad mediante la construcción de nuevas vialidades, la conexión de zonas poco articuladas donde sólo es posible llevar por una vía la ampliación y mejoramiento de algunas existentes.

Características poco amigables del entorno con el adulto mayor y la inaccesibilidad a los servicios son aspectos que deberán estar constantes en la agenda pública de la ciudad, pues la estructura urbana limita las condiciones de la población vulnerable. La situación se agrava aún más ante procesos como el envejecimiento demográfico que se registra cada vez más en las zonas periféricas de la ciudad replicando el proceso de expansión urbana de Toluca.

La metodología y los resultados expuestos en este capítulo pueden ser un insumo aplicable para los tomadores de decisiones en materia urbana, de vialidad y de transporte, dado que identifica, agrupa, cuantifica población y zonifica áreas de atención prioritarias que son la base para cualquier política pública. Esta investigación es completamente replicable y puede complementarse con estudios que involucren la observación de campo, aforos vehiculares y peatonales, encuestas y entrevistas dirigidas a los residentes,

así como estudios etnográficos con los cuales se trabaje con el adulto mayor, si fuera el caso.

El envejecimiento de la población en Toluca está ya manifestándose muy claramente y se espera que en el corto y mediano plazo la población aumente en este grupo de edad y exista un mayor número en las zonas colindantes a la del centro urbano, expandiéndose así hasta la periferia. También es evidente un proceso de envejecimiento que va de las colonias céntricas hacia las periferias, asociándose a otros procesos urbanos como la gentrificación, pues zonas que en un momento fueron habitadas por adultos mayores, están convirtiendo sus usos a comerciales o construcción de departamentos (Smith, 2012).

Esta transformación implica cambios en la dinámica urbana, así como en la identidad local, la oferta servicios y las modificaciones en la estructura demográfica, por lo que es recomendable profundizar en futuras investigaciones, cómo impactan las modificaciones urbanas en la calidad de vida de residentes actuales, si ocasiona desplazamientos voluntarios o forzosos, y cómo se abordan las necesidades de las partes interesadas en el desarrollo urbano sensible a la edad.

Como recomendación de acciones de intervención desde el urbanismo gerontológico, se propone la mejora del alumbrado público, la remodelación de cruces a nivel de calle o simplemente la existencia de banquetas que promuevan el confort y calidad urbana será beneficioso para las personas mayores. A manera de ejemplo, la Ciudad de México ha implementado distintas acciones para mejora de los desplazamientos peatonales, promoviendo ampliación de banquetas, cruces seguros, andadores, con lo cual es ciudad una referencia en motivar espacios públicos y la movilidad de las personas (SEDATU & GIZ, 2019; Welle *et al.*, 2015). Por otra parte, es prioridad la incorporación de sistemas de movilidad urbana que implemente nuevas opciones de desplazamiento en beneficio al transporte público, esto implica exigir mejoras en este transporte y su flota vehicular para que sea un transporte seguro para personas mayores.

Finalmente, en cuanto a las limitaciones de este estudio fueron la disponibilidad de datos, pues en la escala de trabajo no se cuenta con suficiente información desagregada a nivel manzana, de este grupo de población, como se hubiera deseado, por lo que se recurrió a solicitar información al

instituto correspondiente. En la revisión documental se identificaron ambigüedades en la información relativa a los equipamientos urbanos, lo que imposibilitó profundizar en esta temática con un análisis de accesibilidad a corta distancia para los adultos mayores.

Bibliografía

- Álvarez-Lobato, J. A., Trujillo, A., & Garrocho, C. F. (2018). Multifuncionalidad urbana y personas adultas mayores en el Área Metropolitana de la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*, 96. <https://doi.org/10.14350/rig.59611>
- Aranda, J. M. (2000). *Conformación de la zona metropolitana de Toluca, 1960-1990* (1ª. ed.). Centro de Investigación en Ciencias Sociales y Humanidades. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Bazant, J. (2020). *Micro urbanismo: Al rescate del peatón en los espacios urbanos* (1a. ed.). Editorial Trillas.
- Bello, W. (2013). Vulnerabilidad socio-demográfica de las personas de la tercera edad. Estudio de caso, centro histórico de La Habana. *Cuadernos Geográficos*, 52(1), 153–177. <https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/930/1104>
- Buzai, G. (2015). *Análisis espacial en Geografía de la Salud. Resoluciones con Sistemas de Información Geográfica* (1a. ed.). Lugar Editorial .
- Buzai, G., & Montes, E. J. (2021). *Estadística Espacial: fundamentos y aplicación con Sistemas de Información Geográfica*. Universidad Nacional de Luján. Instituto de Investigaciones Geográficas. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/161048>
- Campos, J. (2009). *La geografía de la marginación: enfoque conceptual y metodológico alternativo para el caso de México* [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Campos, J. (2023). Adultos mayores y condiciones relativas de vida: el uso de indicadores espaciales para su focalización en la ZMCT 2020. En *Coloquio Ciudades amigables con los adultos mayores*. El Colegio Mexiquense A. C.
- Campos-Alanís, J., Ramírez-Sánchez, L. G., & Garrocho, C. (2020). Inclusión de la variable espacial en la medición de las condiciones relativas de vida en ciudades mexicanas. *Papeles de Población*, 26(103), 53–88. <https://doi.org/10.22185/24487147.2020.103.03>
- Cárdenas, G. (2021). Envejecer con el lugar. *Revista Planeo*, 46, 21–21. <https://doi.org/10.7764/PLAN.046.095>
- Cárdenas, G. (2022). Envejecer con el lugar: los retos de una ciudad que envejece. En J. Bautista Vergara & J. Delgado Campos (eds.), *Recuperar la ciudad hoy. Modelos urbanos: cuidados, salud, educación, bienestar y ocio: Vol. I* (PUEC-UNAM, pp. 30–66). Universidad Nacional Autónoma de México.

- Cardo, B. (2021). *El urbanismo gerontológico ante el reto del envejecimiento demográfico. El caso de Arganzuela* [Trabajo fin de grado]. Universidad Politécnica de Madrid.
- CEPAL. (2022). *Envejecimiento en América Latina y el Caribe: inclusión y derechos de las personas mayores (LC/CRE.5/3)*. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- Cinderby, S., Cambridge, H., Attuyer, K., Bevan, M., Croucher, K., Gilroy, R., & Swallow, D. (2018). Co-designing Urban Living Solutions to Improve Older People's Mobility and Well-Being. *Journal of Urban Health*, 95(3), 409–422. <https://doi.org/10.1007/S11524-018-0232-Z/TABLES/3>
- Cortés-Topete, M. B., & Tavares-Martínez, R. A. (2022). Oportunidades de inclusión y bienestar de las personas mayores en sus vecindarios. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 37(2), 719–744. <https://doi.org/10.24201/edu.v37i2.2031>
- De la Rosa, J. J., & Castañeda, P. E. (2018). *Indicadores de satisfacción de la infraestructura peatonal en la perspectiva del espacio público saludable en la Ciudad de México* (J. Pablos, ed.; 1a. edición). Universidad Autónoma Metropolitana.
- Ducci, M. E. (1990). *Conceptos básicos de urbanismo*. Trillas.
- Florencio, G., & Real, J. (2019). Propuesta metodológica: Índice de Infraestructura Urbana para el diagnóstico urbanístico sobre el traslado de personas mayores de 60 años en tres AGEB de la Jurisdicción Sanitaria Magdalena Contreras. *Realidad, Datos y Espacio Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 11(1), 52–67. <https://rde.inegi.org.mx/wp-content/uploads/2020/02/RDE30.pdf>
- García de León, A. (1989). La metodología del valor índice medio. *Investigaciones Geográficas*, 19, 69–87. <https://doi.org/10.14350/RIG.58975>
- García-Valdez, M. T., Sánchez-González, D., & Román-Pérez, R. (2019). Envejecimiento y estrategias de adaptación a los entornos urbanos desde la gerontología ambiental. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 34(1), 101–128. <https://doi.org/10.24201/EDU.V34I1.1810>
- Garrocho, C., & Campos, J. (2016). *Segregación socioespacial de la población mayor. La dimensión desconocida del envejecimiento* (1a. ed.). El Colegio Mexiquense, A. C.
- Garrocho, C., & Vilchis, I. (2021). Las Age-Friendly cities facilitan la movilidad de los adultos mayores. *Korpus* 21, 21, 295–316. <https://doi.org/https://doi.org/10.22136/korpus21202135>
- Garza, G. (2010). La transformación urbana de México, 1970–2020. En G. Garza & M. Schteingart (Eds.), *Los grandes problemas de México: Vol. II* (1a. ed., pp. 31–87). El Colegio de México.
- Ham, R. (2010). Envejecimiento demográfico. En B. García & M. Ordorica (eds.), *Los grandes problemas de México: Vol. Vol. 1 Población* (1ª. ed., pp. 53–78). El Colegio de México.
- Herce, M. (2009). *Sobre la movilidad en la ciudad: propuestas para recuperar un derecho ciudadano* (1a. ed.). Editorial Reverté.
- Hillier, B., Penn, A., Hanson, J., Grajewski, T., & Xu, J. (1993). Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement. *Environment & Planning B: Planning & Design*, 20(1), 29–66. <https://doi.org/10.1068/b200029>

- Hoyos-Castillo, G., & Camacho-Ramírez, M. D. (2010). Vialidad Paseo Tolloca en la Ciudad de Toluca. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 12(2), 221–247.
- Huenchan, S. (2021). *Indicadores sobre envejecimiento y personas mayores en Centroamérica, México y el Caribe hispano*. www.cepal.org/apps
- Instituto Nacional de las Personas Adultas Mayores (INAPAM) (2019). Ciudades amigables con las personas mayores. <https://www.gob.mx/inapam/articulos/ciudades-amigables-con-las-personas-mayores?idiom=es#:~:text=En%20Quintana%20Roo%2C%20se%20est%C3%A1,personas%20mayores%20que%20las%20j%C3%B3venes>.
- INEGI. (2021). *Características del entorno urbano 2020. Síntesis metodológica y conceptual*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825199425.pdf
- Koohsari, M. J., Owen, N., Cerin, E., Giles-Corti, B., & Sugiyama, T. (2016). Walkability and walking for transport: Characterizing the built environment using space syntax. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s12966-016-0448-9>
- Liévanos, J. (2016). *El papel del Centro Histórico de Toluca como centralidad en la Zona Metropolitana de Toluca desde una perspectiva histórica* [tesis de maestría]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Marzo, R. R., Khanal, P., Shrestha, S., Mohan, D., Myint, P. K., & Su, T. T. (2023). Determinants of active aging and quality of life among older adults: systematic review. *Frontiers in Public Health*, 11, 1193789. <https://doi.org/10.3389/FPUBH.2023.1193789/BIBTEX>
- Mesillas, M. I. (2021). *Bienestar y vejez: un análisis espacial de la Zona Metropolitana de Toluca* [tesis de maestría]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Miralles-Guasch, C. (2002). *Ciudad y transporte. El binomio imperfecto*. Ariel Geografía.
- Montejano-Escamilla, J. A., Caudillo-Cos, C. A., & Ávila-Jiménez, F. G. (2023). Expansión y crecimiento urbanos en México, 1975-2020. *región y sociedad*, 35, e1734. <https://doi.org/10.22198/rys2023/35/1734>
- Montoya, J., & Montes de Oca, H. (2006). Envejecimiento poblacional en el Estado de México: situación actual y perspectivas futuras. *Papeles de Población*, 12(50), 117–146. <https://rppoblacion.uaemex.mx/article/view/8651>
- Narváez-Montoya, O. L. (2012). Envejecimiento demográfico y requerimientos de equipamiento urbano: hacia un urbanismo gerontológico. *Papeles de Población*, 18(74). <https://rppoblacion.uaemex.mx/article/view/8416>
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (2007). *Ciudades Globales Amigables con los Mayores: una Guía*. <https://iris.who.int/handle/10665/43805>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). La Red Mundial de Ciudades y Comunidades Adaptadas a las Personas Mayores. <https://www.who.int/es/publications/i/item/WHO-FWC-ALC-18.4>
- Paranaíba, A. (2018). Praxeology and Space Syntax: *MISES: Interdisciplinary Journal of Philosophy, Law and Economics*, 6(2). <https://doi.org/10.30800/MISES.2018.V6.565>

- Pereira, R. H. M., & Herszenhut, D. (2023). *Introduction to urban accessibility: a practical guide with R* (First). Ipea - Institute of Applied Economic Research. <https://doi.org/http://dx.doi.org/9786556350653>
- Pérez, R., & Viramontes, L. Y. (2022). El papel de la banqueta en la vida social urbana. En G. Capron, J. Monnet, & R. Pérez (eds.), *Banquetas: el orden híbrido de las aceras en la Ciudad de México y su área metropolitana* (1a. ed., pp. 187–214). Universidad Autónoma Metropolitana.
- Reyes, R. C. y M., & Cárdenas, J. (2018). *Ingeniería de tránsito. Fundamentos y aplicaciones*.
- Reyes, V., Suárez, M., & Delgado, J. (2019). *La Merced: movilidad y flujos de personas en un mercado popular antiguo* (1a. ed.). Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad.
- Rivera, J., & González, I. de L. (2024). Desigualdad en salud en los entornos urbanos: construcción de los estilos de vida en el envejecimiento. En G. Cárdenas & G. Villagómez (Eds.), *Envejecer en el lugar. Vejez y territorios con sentido* (1a. edición, pp. 87–114). Universidad del Caribe. <https://www.researchgate.net/publication/378741778>
- Rogers, W. A., Ramadhani, W. A., & Harris, M. T. (2020). Defining Aging in Place: The Intersectionality of Space, Person, and Time. *Innovation in Aging*, 4(4), 1–11. <https://doi.org/10.1093/GERONI/IGAA036>
- Sánchez, D. (2007). Envejecimiento demográfico urbano y sus repercusiones socioespaciales en México: retos de la planeación gerontológica. *Revista de geografía Norte Grande*, 38, 45–61. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022007000200003>
- SEDATU, & GIZ. (2019). *Ciudades para la movilidad: Mejores prácticas en México*. <https://www.gob.mx/sedatu>
- Smith, N. (2012). La nueva frontera urbana. Ciudad revanchista y gentrificación. Madrid. Traficantes de sueños. Mapas.
- Sobrinho, J. (1995). Funciones económicas predominantes del sistema metropolitano de México. En C. Garrocho & J. Sobrinho (eds.), *Sistemas metropolitanos: nuevos enfoques y prospectiva* (1ª. Ed., pp. 245–270). El Colegio Mexiquense A. C: Sedesol.
- Spijker, J. (2023). El futuro del envejecimiento en América Latina y el Caribe: nuevas perspectivas metodológicas. *Papeles de población*, 28(114), 15–38. <https://doi.org/10.22185/24487147.2022.114.27>
- Trujillo, A., Álvarez, J. A., & Garrocho, C. (2022). Índice de multifuncionalidad urbana y local para personas adultas mayores en zonas metropolitanas de México: concepto, método y aplicación. *Decumanus*, 9(9), 1–22. <https://doi.org/10.20983/DECU-MANUS.2022.2.3>
- Unikel, L. (1976). *El desarrollo urbano de México, Diagnóstico e implicaciones futuras* (2a. ed.). El Colegio de México.
- Welle, B., Qingnan, L., Li, W., Adiazola-Steil, C., Sarmiento, C., & Obelheiro, M. (2015). *Ciudades más seguras mediante el diseño. Lineamientos y ejemplos para promover la seguridad vial mediante el diseño urbano y vial*.
- WHO. (2002). *ACTIVE AGEING: A POLICY FRAMEWORK Active Ageing*. <https://iris.who.int/handle/10665/67215>

- Yamu, C., van Nes, A., & Garau, C. (2021). Bill Hillier's Legacy: space syntax—A Synopsis of Basic Concepts, Measures, and Empirical Application. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 3394, 13(6), 3394. <https://doi.org/10.3390/SU13063394>
- Zoido, F., Benayas, S. de la V., Morales, G., Mas, R., & Lois, R. (2000). *Diccionario de geografía urbana, urbanismo y ordenación del territorio* (1a. ed.). Ariel, S. A.

2. Análisis espacial de áreas con aptitud para la expansión urbana, mediante evaluación multicriterio

NOELIA CECILIA PRINCIPI*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.279.02>

Resumen

Este capítulo detalla el marco teórico-metodológico de las técnicas de Evaluación multicriterio (EMC), destacando su papel en la toma de decisiones mediante la evaluación de múltiples criterios y prioridades. Este proceso, que incluye la definición del problema, la búsqueda y evaluación de alternativas, y la selección de la opción óptima, es fundamental para la toma de decisiones espaciales complejas.

La EMC y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se combinan y permiten profundizar el análisis espacial cuantitativo en pos de optimizar la capacidad de acogida del territorio, evaluando factores y restricciones a nivel locacional. Este enfoque integrador es importante para la planificación territorial y la resolución de problemas socioespaciales complejos.

Se presenta, a modo de ejemplo, una aplicación en el partido de Luján (Buenos Aires, Argentina), donde se integran diversas variables espaciales y se genera un mapa de aptitud urbana con la identificación de las áreas óptimas para el desarrollo o la expansión urbana.

Palabras clave: *expansión urbana, evaluación Multicriterio (EMC), Sistemas de Información Geográfica (SIG), Planificación territorial*

* Doctora en Geografía. Docente-investigadora del Instituto de Investigaciones Geográficas de la Universidad Nacional de Luján. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8819-6743/> ; Scopus: 57204362582

Introducción

La expansión urbana plantea un gran desafío para los organismos de planificación y gestión territorial, especialmente en áreas periféricas donde el crecimiento puede generar desigualdades espaciales en el acceso a servicios urbanos esenciales o en terrenos con aptitudes para diversos usos, generando conflictos de ubicación.

En este contexto, es fundamental avanzar en estudios geográficos que, a través del análisis espacial, faciliten la toma de decisiones acerca de la localización de diferentes usos del suelo, identificando aquellas áreas que presenten las mayores aptitudes para la expansión urbana y, de esta forma, poder dirigir políticas de planificación hacia esos sectores.

La Agenda 2030 de las Naciones Unidas (ONU, 2016), establece diecisiete “Objetivos de Desarrollo Sostenible” (ODS), incluyendo el de lograr “ciudades y comunidades sostenibles”, donde se destaca la importancia de abordar el problema del crecimiento urbano descontrolado, especialmente en países en desarrollo, que enfrentan desafíos relacionados con infraestructuras y servicios insuficientes o sobrecargados.

En este sentido, el conocimiento del territorio es fundamental y resulta necesario que las decisiones que se toman en el marco de la planificación estén apoyadas por evaluaciones de carácter científico, derivadas de procesos de análisis espacial, tal como lo permiten las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) a partir de procesar y relacionar diferentes variables de índole espacial con apoyo en los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El presente capítulo presenta el desarrollo teórico-metodológico y la aplicación de técnicas de EMC con el propósito de generar un mapa de aptitud urbana que permita determinar las zonas con mayores posibilidades de expansión o desarrollo del uso de suelo urbano en el partido de Luján (Buenos Aires, Argentina), considerando diversos criterios espaciales. Se trata de un ejemplo de aplicación de análisis espacial sencillo, pero no por esto menos efectivo en la búsqueda de soluciones a problemáticas socioespaciales complejas.

Teoría de la decisión y Evaluación Multicriterio

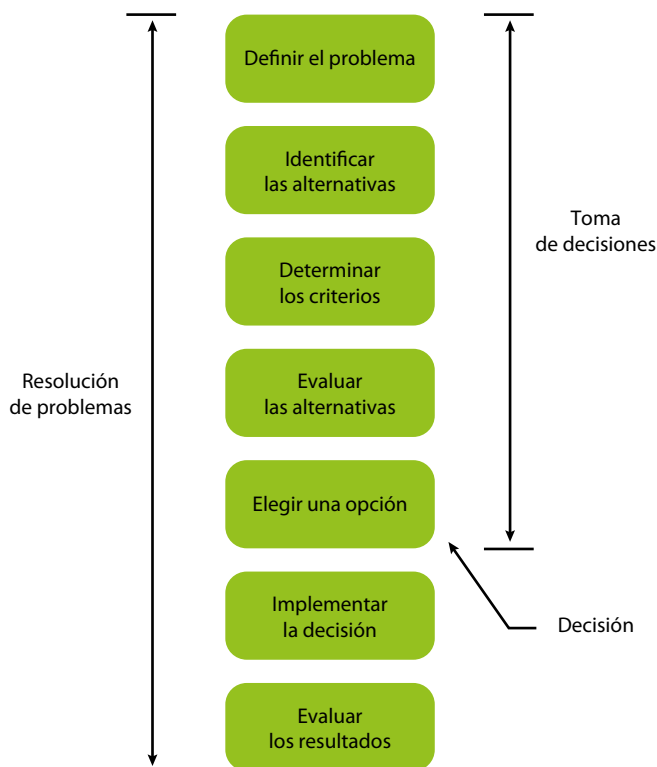
La Evaluación Multicriterio (EMC) engloba un conjunto de técnicas diseñadas para facilitar el proceso de toma de decisiones y se enmarca en la teoría de la decisión que encarga de analizar cómo se elige una acción que, dentro de un conjunto de acciones posibles, conduce al mejor resultado, según determinadas preferencias (Malczewski y Rinner, 2015)

La finalidad principal radica en asistir al responsable de tomar decisiones en la selección de la alternativa óptima entre un conjunto de opciones factibles, considerando la existencia de múltiples criterios y diversas prioridades asociadas a esos criterios.

Esto se da en un proceso de resolución de problemas que según Jankowski (1995), referenciando a McKenna (1980), consta de cuatro pasos fundamentales en un modelo racional de resolución de problemas: 1) *definición del problema*, que implica reconocer la discrepancia entre el estado actual y el estado deseado como una necesidad que requiere una decisión, 2) *búsqueda de alternativas y criterios de selección*, donde se establecen las alternativas factibles y los criterios para evaluarlas, 3) *evaluación de alternativas*, que consiste en evaluar los impactos de cada alternativa en cada criterio de evaluación y finalmente 4) *selección de alternativas*, que consiste en ordenar las alternativas de la más a la menos deseable y seleccionar la más óptima o las mejores opciones, para una evaluación adicional.

Toskano Hurtado (2005), por su parte, amplía los pasos del proceso de resolución de problemas a partir un modelo para optimizar la toma de decisiones que consta de siete pasos, de los cuales los cinco primeros corresponden específicamente a la toma de decisiones. Esto incluye, desde la identificación y definición del problema hasta que la elección de una alternativa de solución (figura 1). Lo propuesto por el autor, al ser expresado desde una perspectiva conductual —no matemática— permite su aplicación para describir prácticamente cualquier situación de toma de decisiones, incluyendo las decisiones espaciales.

Según el relevamiento realizado por Páez Gallego (2015) el inicio del estudio de la toma de decisiones surge en el siglo XVII, liderado principalmente por autores franceses. Estos pioneros se destacaron por desarrollar

Figura 1. Proceso de toma de decisiones

Fuente: Toskano Hurtado, 2005:14.

modelos matemáticos destinados a identificar regularidades en el comportamiento óptimo durante la toma de decisiones en juegos de azar. El primer trabajo documentado data de 1738 y es atribuido a Daniel Bernoulli (1700-1782). Con el tiempo, el estudio de la teoría de la decisión se expandió hacia otros campos en los que el comportamiento decisional humano desempeñaba un papel crucial.

Bernoulli introdujo un enfoque psicológico al reemplazar el concepto de *valor* por el de *utilidad*, definiendo esta última como la asignación de un valor subjetivo, único para cada individuo, a las distintas cantidades monetarias que se pueden ganar. Este cambio implicó la introducción del componente racional en la búsqueda de la máxima utilidad esperada en las decisiones.

A partir de este momento, la dicotomía que rige el estudio de la conducta decisoria se divide en dos modelos: los modelos normativos, que buscan explicar la mejor forma de decidir y que se han vinculado fundamentalmente al campo de la economía, y los modelos descriptivos, que intentan describir cómo las personas toman decisiones en la práctica y que se relacionan originalmente al campo de la lógica, la psicología y la sociología.

Por su parte, Malczewski y Rinner (2015), se remontan a los modelos de decisión del siglo XVIII, sobre sistemas de votación preferencial por rango, atribuidos a los franceses Jean-Charles de Borda (1733-1799) y Nicolás de Condorcet (1743-1794). Los autores manifiestan que recién en la segunda mitad del siglo XIX Francis Edgeworth (1845-1926) y Vilfredo Pareto (1848-1923) propusieron una metodología para integrar criterios contradictorios en un único índice de evaluación. Este último introdujo uno de los conceptos esenciales de la teoría de la decisión moderna: la eficiencia, también conocido como el óptimo de Pareto. El trabajo de Pareto ha sido crucial para el desarrollo de modelos de decisión en diversos campos del conocimiento, como la ciencia regional (Isard, 1969), la planificación urbana y regional (Chadwick, 1973) y la Geografía (Chorley y Haggett, 1967).

Según plantean Gómez Delgado y Barredo Cano (2006) en la década de los setenta, se estableció fuertemente el paradigma de la toma de decisiones multicriterio, marcando una revolución en el campo de la teoría de la decisión dentro del enfoque normativo. Este nuevo paradigma comenzó a abordar la resolución de problemas decisionales más complejos, donde los criterios y objetivos pueden ser múltiples, e incluso se pueden dar situaciones donde los objetivos pueden entrar conflictos entre sí.

En este trabajo, se abordará el enfoque normativo a partir de las aplicaciones en el entorno SIG que han permitido ampliar la toma de decisiones hacia el ámbito locacional, a través de la evolución hacia la toma de decisiones espaciales.

Evaluación Multicriterio y sistemas de información geográfica

Las decisiones acerca de cuál es la mejor zona para la asignación de determinado uso de suelo suele implicar la evaluación de diversos criterios que

responden a diferentes objetivos, que incluso a veces pueden ser conflictivos. A partir de los SIG existe la posibilidad de llevar a cabo un proceso de toma de decisiones locacionales, a través de herramientas específicas de análisis espacial que permiten respaldar este proceso.

En la implementación de estos modelos de decisión espaciales, los SIG desempeñan un papel crucial en la búsqueda de alternativas viables, particularmente la búsqueda de alternativas y criterios de selección, ya que tradicionalmente la búsqueda de ubicaciones, rutas y asignaciones de uso del suelo se realizaba mediante superposiciones manuales de mapas en el análisis de idoneidad y a partir de la llegada de los SIG y su capacidad para superponer mapas digitales, estos estudios se volvieron más sofisticados permitiendo incorporar una gran cantidad de variables, lo que permitió el abordaje de problemáticas espaciales más complejas (Jankowski, 1995).

Existen diversas metodologías de superposición cartográfica aplicables a datos espaciales que se representan mediante diferentes capas temáticas. Estas técnicas son fundamentalmente parte del ámbito conocido como “modelado cartográfico”, (Tomlin, 1990; DeMers, 2002). Un destacado progreso en el campo del modelado cartográfico lo constituyen justamente las técnicas EMC, detalladas extensamente por Gómez Delgado y Barredo Cano (2006) y Buzai y Baxendale (2011), las cuales amplían las posibilidades de trabajo hacia la obtención de resultados como escenarios de posibilidades a futuro, que están altamente vinculados a los procedimientos subjetivos, necesarios en el funcionamiento de metodologías objetivas.

A través de la EMC se evalúan diversas alternativas a través de múltiples criterios, considerando uno o varios objetivos. Cuando se abordan objetivos de decisión múltiples, se utiliza el término Evaluación Multiobjetivo (EMO), un ejemplo se encuentra en Buzai y Principi (2017), donde a través de la aplicación del modelo de resolución estandarizada *Land-use Conflict Identification Strategy* (LUCIS), desarrollado por Carr y Zwick (2006, 2007) se consideraron tres objetivos posibles vinculados a diferentes usos de suelo (urbano, agrícola y conservación) y a través del modelo se identificaron áreas de potencial conflicto entre los usos de suelo considerados. Por otro lado, si la EMC persigue un único objetivo, nos encontramos ante un análisis multicriterio-uniojetivo (figura 2), tal como se abordará en este capítulo. Otros ejemplos pueden encontrarse en Principi (2021 y 2017) donde

se aplica el análisis de EMC con objetivos únicos, vinculados a la expansión urbana y el desarrollo agropecuario, en la ciudad de Luján y en la cuenca hidrográfica del río Luján, respectivamente.

Para alcanzar los objetivos establecidos, se pueden aplicar diversas técnicas, como análisis *booleanos*, media ponderada ordenada o combinación lineal ponderada, entre otras¹.

En el presente trabajo, la aplicación de técnicas de EMC mediante SIG tiene como objetivo realizar una evaluación de la aptitud o capacidad de acogida del territorio, en relación con funciones o actividades específicas definidas en el proceso de evaluación, que en este caso se vincula al uso de suelo urbano.

Según Gómez Orea (2008) la capacidad de acogida del territorio se define como la relación entre el entorno físico y las actividades humanas, podría considerarse como el “grado de idoneidad” para su uso, teniendo en cuenta tanto su fragilidad como su potencialidad. Esta noción implica la convergencia entre aquellos que evalúan la relación desde la perspectiva del entorno, principalmente en términos de impacto, y aquellos que la perciben desde la actividad o uso, principalmente en términos de aptitud o potencial del territorio, centrando la búsqueda de las condiciones más favorables.

El análisis de EMC se inicia con información básica compuesta por variables cartográficas (capas) que actúan como criterios para llevar a cabo los procedimientos de evaluación. La correcta elaboración de estos criterios es esencial ya que, como señalan Eastman *et al.* (1993) un criterio es la base para la toma de una decisión y debe ser medible y evaluado, ya que es la evidencia sobre la cual se basa tal decisión.

En este contexto, existen dos tipos de criterios: los factores, que presentan valores continuos o discretos de aptitud locacional en cada variable, y los limitantes, también conocidos como restricciones, que operan con la finalidad de asignar resultados en un sector delimitado del área de estudio con un propósito restrictivo. Mientras que los factores resaltan la posibilidad de ciertas alternativas, los limitantes restringen la disponibilidad de opciones en función de lo que se está evaluando.

¹ El detalle de las diversas técnicas mencionadas se puede encontrar en el capítulo 7 de: Buzai, G. y Baxendale, C. 2011. *Análisis socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*. Tomo 1. Lugar Editorial. Buenos Aires.

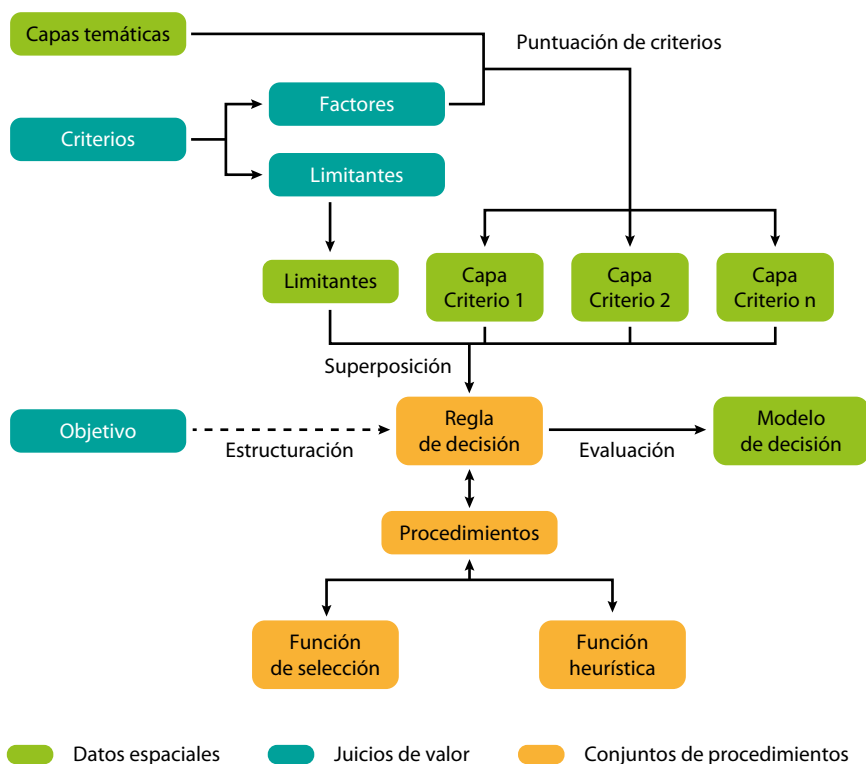
Las formas de vinculación de los criterios se denominan “reglas de decisión”, y su proceso de aplicación se conoce como evaluación. Como existen diversas formas para determinar estructuras espaciales, la flexibilidad en el manejo de la información es un aspecto fundamental en esta instancia, ya que los resultados pueden variar en función de la importancia que se les asigne a los criterios involucrados.

Por esto, la regla de decisión debe permitir la integración coherente de los diferentes criterios implicados en la evaluación. Una vez que la regla de decisión está estructurada, el siguiente paso, denominado evaluación, es lo que finalmente generará el modelo de decisión con los resultados finales de la EMC. Se pueden realizar varias evaluaciones variando alguno de los aspectos considerados, con el fin de comparar resultados.

Además, es importante considerar que la regla de decisión puede contemplar la realización de dos tipos de procedimientos: la función de selección, que implica procedimientos matemáticos para comparar alternativas y seleccionar aquella que mejor cumpla los objetivos propuestos, generalmente a través de un proceso de optimización y comparación de todas las posibles soluciones, y la selección heurística, más comúnmente utilizada debido a su simplicidad, ya que no se utiliza una función matemática sino que se especifica el procedimiento a seguir en la evaluación y selección de la mejor alternativa (Eastman *et al.*, 1993).

Gómez Delgado y Barredo Cano (2006) justamente presentan un ejemplo de aplicación de estos procedimientos para el caso de evaluación de la capacidad para el asentamiento urbano, similar al que se presentará en este trabajo. En este sentido, a través de la función de selección sería posible definir las áreas susceptibles de ser o no urbanizadas, formando, por ejemplo, grupos jerárquicos de capacidad de urbanización, a partir de procedimientos de clasificación o, por otro lado, aplicar una función heurística para seleccionar las mejores áreas para el asentamiento urbano, con procedimientos de selección, tal como se llevará adelante en la evaluación propuesta.

Los modelos de decisión Multicriterio/Multiobjetivo han consolidado un cuerpo teórico y metodológico maduro que ya ha sido considerado por varios autores en la toma de decisiones espaciales en el campo de la Geografía Aplicada. Este enfoque ha encontrado aplicaciones significativas en la planificación territorial, especialmente a través de la integración de técnicas de EMC con SIG,

Figura 2. Sistema de integración entre SIG y EMC

Fuente: Gómez Delgado, M.; Barredo Cano, J. I. (2006:48).

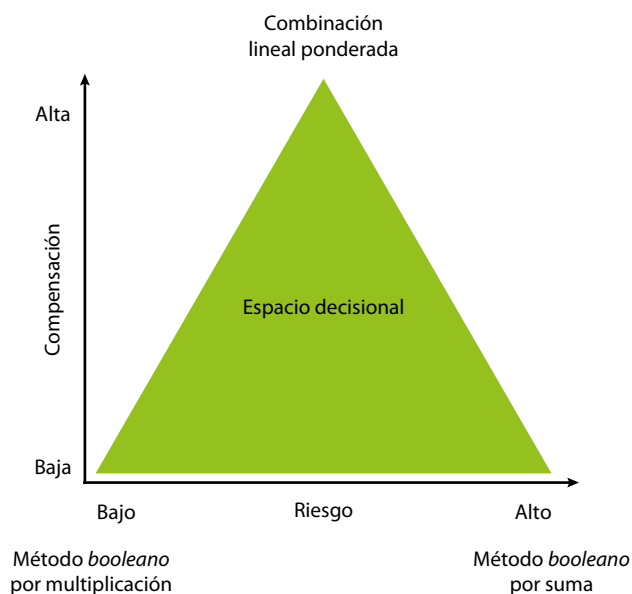
ofreciendo modelos operativos para abordar el proceso de ordenamiento territorial y las propuestas de solución a problemas socioespaciales complejos.

Buzai y Baxendale (2011) explican que las decisiones locacionales se encuentran dentro de un triángulo de decisiones estratégicas (figura 3), delineado por dos ejes ortogonales: el eje x representa el nivel de riesgo, y el eje y representa el nivel de compensación a través de los valores de ponderación de los factores considerados. Existen diversas técnicas para mover la decisión locacional dentro de este triángulo. Las soluciones posibles se presentan mediante métodos *booleanos*, como la multiplicación para un análisis de riesgo mínimo sin compensación, la suma para un escalonamiento hacia el riesgo máximo sin compensación, y la combinación lineal

ponderada para un análisis de riesgo medio con máxima compensación. Por lo tanto, el progreso metodológico en la toma de decisiones de localización espacial dependerá de la flexibilidad para determinar diversas posiciones dentro de ese espacio estratégico.

El objetivo último, que consiste en identificar los mejores lugares de ubicación, se puede alcanzar, entonces, principalmente mediante procedimientos *booleanos* o de combinación lineal ponderada (WLC- *Weighted Linear Combination*). El primero superpone mapas de aptitudes discretas para obtener resultados claramente definidos y con aptitudes fijas, mientras que el segundo incorpora elementos de incertidumbre en situaciones empíricas más realistas.

Figura 3. Triángulo de decisiones estratégicas



Fuente: Buzai y Principi (2017) en base a Buzai y Baxendale (2011).

Proceso de análisis jerárquico

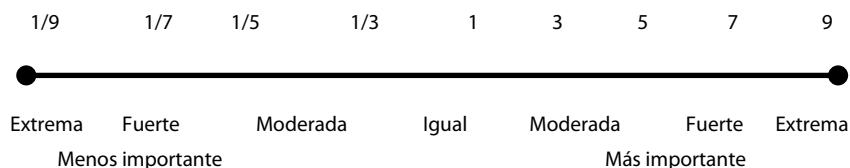
Como se adelantó, un paso importante en el proceso de EMC implica la asignación de valores o pesos a los distintos criterios, con el fin de expresar

su importancia en términos cuantitativos. Este procedimiento puede generar controversias debido a la forma en que se asignan dichos pesos. Por tanto, resulta fundamental emplear un método de ponderación que respalde la determinación de los pesos de manera objetiva. Uno de los métodos más ampliamente utilizado y reconocido en el ámbito de las decisiones multicriterio es el Proceso de Análisis Jerárquico (*Analytical Hierarchy Process-AHP*), propuesto por el matemático Thomas Saaty, en 1980.

El método AHP posibilita la modelización del problema de toma de decisiones mediante una estructura jerárquica, utilizando comparaciones entre pares de criterios para incorporar las preferencias del investigador o el tomador de decisiones. Esto se realiza mediante una escala de razón considerada válida para decisiones complejas (Saaty, 1987).

Los criterios se organizan en una matriz cuadrada cuyo tamaño está determinado por el número de criterios a ponderar. Así, se crea una matriz de comparación por pares de criterios, donde se evalúa la importancia de cada uno en relación con los demás, a través de juicios de valor. Estos juicios pueden fundamentarse teóricamente, ser prácticos o derivar de consultas a expertos, según el objetivo de la toma de decisiones. Se utiliza una escala de medida para asignar pesos a los criterios según su importancia, la cual se detalla en la figura 4.

Figura 4. Escala de medida para la asignación de los juicios de valor en los criterios



Fuente: Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005: 73.

La matriz es recíproca, es decir, los valores asignados a ambos lados de la diagonal son inversos. Una vez establecidos los valores en la matriz de comparación por pares, se realiza el cálculo del vector de prioridad (w_j), que representa el orden de prioridad de los criterios. El procedimiento consiste

en obtener los valores de la matriz normalizados por columnas, a partir del cociente entre cada valor de celda y el valor de la sumatoria de cada columna. Luego, estos valores se suman por filas para obtener el vector de prioridad de cada criterio.

Estos valores también se normalizan, dividiendo cada uno de los valores del vector entre el número de criterios. De aquí se obtienen los diferentes pesos (w_{j_nor}) que van a proporcionar una medida cuantitativa de consistencia de los juicios de valor entre pares de factores.

El método AHP proporciona una medida operativa de la consistencia en la asignación de pesos a través del vector de prioridad máximo (λ_{MAX}), que se obtiene multiplicando el vector de prioridad normalizado por la matriz de comparación por pares y se utiliza para evaluar la consistencia al analizar la proporcionalidad de las preferencias implícitas en los juicios de valor asignados. Para calcularlo, se realiza una suma lineal ponderada de los pesos de cada alternativa, según su peso normalizado (w_{j_nor}). Posteriormente, los resultados se dividen por sus respectivos pesos (w_{j_nor}). El promedio de los valores obtenidos corresponde al $\lambda_{máx}$ del criterio analizado.

Este análisis se complementa con el cálculo de la Razón de Consistencia (RC). La RC se obtiene dividiendo el valor del índice de consistencia (IC) por el índice aleatorio medio (IAM). El IC se determina mediante la siguiente fórmula, donde n es el número de criterios en la matriz de comparación:

$$IC = (\lambda_{máx} - n) / (n - 1)$$

Para el Índice Aleatorio Medio (IAM) de matrices recíprocas cuadradas, se utilizan los siguientes valores (tabla 1), presentados por Saaty (1987):

Tabla 1. Valores de IAM para matrices cuadradas de orden n

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IAM	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,4	1,45	1,49

Fuente: Saaty (1987).

Cuando RC inferior a 0,10 se considera que los juicios de valor están dentro de los límites recomendados, son consistentes y se debe continuar con el proceso. Si el valor es mayor o igual a 0,10 los juicios deben ser revisados, ya que no serían lo suficientemente consistentes para establecer los pesos (Gómez Delgado y Barredo Cano, 2006).

A diferencia de otros métodos, como la lógica fuzzy o los modelos de regresión espacial, el método AHP ofrece una ventaja significativa en la interpretación de resultados, al proporcionar un marco claro y transparente para la asignación de pesos, mientras que la lógica fuzzy puede ser útil en contextos de mayor incertidumbre, ya que su aplicación requiere definiciones precisas de funciones de membresía para representar el grado de pertenencia de un valor a un conjunto difuso, lo que puede introducir subjetividad adicional (Malczewski, 2002). Por otro lado, los modelos de regresión espacial pueden identificar relaciones entre variables, pero no permiten una integración flexible de criterios cualitativos y cuantitativos, como lo hace AHP (Anselin, 1999).

Desafíos y limitaciones de la EMC en la planificación territorial

El crecimiento urbano del siglo XXI no puede desvincularse de los desafíos ambientales globales. La expansión de las ciudades debe contemplar no sólo la disponibilidad de suelo, sino también su impacto en la contaminación, el cambio climático y la pérdida de biodiversidad. Estos tres factores conforman lo que se denomina, desde la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, como la triple crisis climática, un fenómeno que representa una de las mayores preocupaciones a nivel mundial y que ha sido reconocido como una amenaza crítica para la sostenibilidad de los sistemas urbanos y ecológicos (UNFCCC, 1992).

En este sentido, incorporar variables climáticas en la EMC permitiría evaluar la sostenibilidad de las áreas propuestas para urbanización. Uno de los aspectos fundamentales es la disponibilidad de recursos hídricos, debido a que las ciudades en expansión requieren garantizar el acceso al agua potable y al saneamiento, lo que implica considerar la capacidad de las fuentes de abastecimiento y la eficiencia en la gestión de estos recursos. Asimismo,

la presencia de espacios verdes es esencial para mitigar el efecto de isla de calor urbano y proporcionar servicios ecosistémicos clave para la calidad de vida de la población (Wong y Yu, 2005).

Si bien la EMC ha demostrado ser una herramienta eficaz para la planificación territorial, su aplicación enfrenta ciertos desafíos y limitaciones que deben ser considerados para una implementación efectiva. Uno de los principales retos es la subjetividad inherente a la asignación de pesos en los criterios de evaluación. Aunque el método AHP y otros métodos similares, proporcionan un marco sistemático para minimizar esta subjetividad, la ponderación de criterios sigue dependiendo de la percepción de los tomadores de decisiones y expertos consultados.

Otro desafío importante es la disponibilidad y calidad de los datos espaciales. La precisión de los resultados de EMC depende en gran medida de la resolución y actualidad de la información utilizada. En contextos urbanos en rápida transformación, la falta de datos actualizados puede afectar la validez de los análisis. Además, la integración de criterios ambientales, sociales y económicos requiere bases de datos geográficas homogéneas, que no siempre están disponibles en los niveles de desagregación espacial necesarios.

Aplicación de la EMC para expansión urbana en el partido Luján

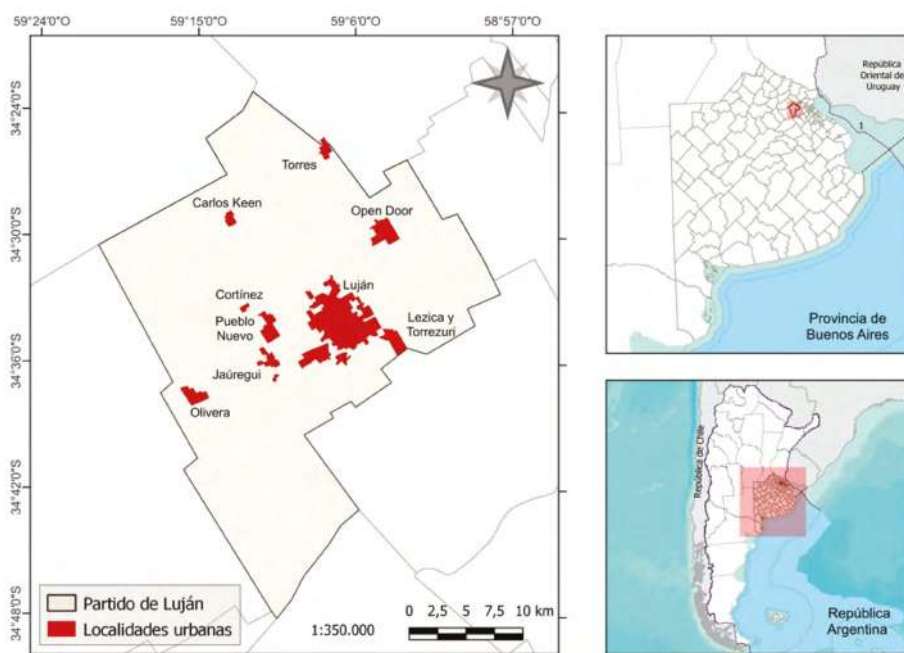
El área de estudio donde se realizará la aplicación de la EMC es el partido de Luján (figura 5), uno de los 135 partidos que conforman la provincia de Buenos Aires, en la República Argentina. Éste se encuentra ubicado en el último anillo de la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA). La localidad cabecera del partido, Luján se encuentra a 68 km de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), pero si se considera su mancha urbana, es decir, la ciudad desde un punto de vista físico como aglomeración, se encuentra separada a sólo 2 km del extremo del corredor Oeste del Gran Buenos Aires (Humacata, 2017). En un trabajo realizado por Buzai y Montes Galbán (2020) se mostraron evidencias que indican que Luján ya forma parte de la Megaciudad Buenos Aires, a partir de considerar la infraestructura gris, teniendo en cuenta conjuntamente el espacio adaptado y el sistema de flujos.

El partido de Luján ocupa una superficie total de 777 km² y comparte límites, al norte con el partido de Exaltación de la Cruz, al este y noreste con Pilar, y al este y sudeste con General Rodríguez. Se encuentra dentro de la denominada llanura pampeana, drenando al occidente la subregión de la pampa ondulada y al oriente la subregión del Delta, con un relieve que es marcadamente llano, con una suave pendiente que disminuye de oeste a este, rondando los 60 msnm.

Según los datos del último Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas realizado el 2022, la población total es de 111 365 habitantes (INDEC, 2023).

El partido está compuesto por varias localidades: Jáuregui, Pueblo Nuevo, Cortines, Carlos Keen, Open Door, Torres y Olivera. Históricamente, la ciudad cabecera ha concentrado alrededor del 75% de la población urbana total del partido.

Figura 5. Área de estudio: partido de Luján (Buenos Aires, Argentina)



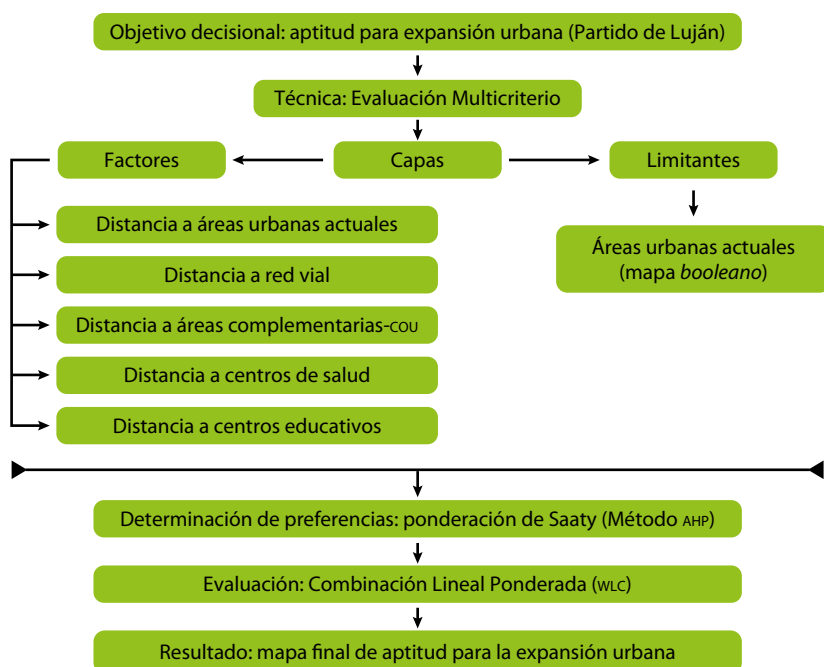
Fuente: elaboración propia a partir de datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de la República Argentina.

Hacia el mapa de aptitud urbana

Las definiciones preliminares implicaron evaluar diversas capas temáticas con información relevante para su inclusión en el análisis de la aptitud urbana en el partido de Luján. Todas las variables en formato vectorial fueron convertidas al formato raster para aplicar la EMC en el *software Terrset*. En este proceso, la intervención del investigador-decisor es crucial al determinar qué variables se incluyen, qué peso se le otorga a cada una, considerando su importancia para el objetivo de expansión o desarrollo urbano. Se trata de una aplicación exploratoria y a modo de ejemplo, a partir de datos disponibles que podrían ampliarse para mejorar el análisis.

A continuación, se presenta el esquema metodológico utilizado (figura 6) y se explicitan los pasos y decisiones llevadas a cabo para el análisis de EMC.

Figura 6. Diagrama de solución



Fuente: Elaboración propia.

Definición del objetivo

En este caso se trata de una EMC con un único objetivo decisional, que es determinar las áreas que presentarían mayor aptitud para la expansión o el desarrollo del uso de suelo urbano en el partido de Luján.

Base de datos geográfica

Se hizo la recopilación de información a partir de antecedentes y trabajos en el área de estudio, relacionados con la temática propuesta. Se seleccionaron, actualizaron y realizaron bases cartográficas a partir de diferentes fuentes de información oficiales. Las capas en formato vectorial se convirtieron a raster, cada una de estas se considera un tema diferente a nivel cartográfico: áreas urbanas, red vial, centros educativos, centros de salud, radios censales y zonificación del Código de Ordenamiento Urbano (COU) del Partido de Luján (tabla 2).

Tabla 2. Capas temáticas de la base de datos cartográfica

<i>Capa temática</i>	<i>Descripción</i>	<i>Fuente</i>
Áreas urbanas actuales	Áreas urbanas del partido de Luján 2020. La digitalización se realizó a partir de la interpretación visual de imágenes satelitales de Sentinel 2, color natural, con fecha 4/3/20, con un pixel de 20 metros de lado.	Satélite Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés)
Centros de salud	Capa de puntos con los centros de salud del Partido de Luján. Se consideran hospitales, centros periféricos y centros de atención primaria de la salud.	Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina - IGN
Centros educativos	Capa de puntos con los centros educativos del Partido de Luján. Se contemplan centros públicos y privados, desde nivel inicial hasta universitario.	Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina - IGN
Código de Ordenamiento Urbano (COU) del Partido de Luján.	Capa temática con la zonificación vigente del Partido de Luján donde se contemplan áreas complementarias para el desarrollo o expansión urbana.	Municipio de Luján
Radio Censales	Capa temática con los radios censales del Partido de Luján del Censo 2010, con datos de población. Utilizada para el cálculo de densidad poblacional. Los radios son la unidad mínima de representación de los datos censales, están definidos por un espacio territorial con límites geográficos y una determinada cantidad de unidades de viviendas a relevar en cada Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. En promedio, un radio censal incluye 300 viviendas, aunque hay que considerar que para bordes de las localidades el radio puede descender a 200 viviendas.	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de la República Argentina - INDEC

<i>Capa temática</i>	<i>Descripción</i>	<i>Fuente</i>
Red vial	Capa temática compuesta por las rutas nacionales, rutas provinciales y complementada con los principales accesos viales.	IGN–Complementación propia con vinculación de QGIS y Google Satélite.

Fuente: elaboración propia.

Análisis de aptitud

Aquí se explicita la regla de decisión de acuerdo al objetivo planteado y se aplica la metodología, a través de la superposición de las capas temáticas.

Se generan factores con valores en el rango de 0 a 255 mediante una estandarización difusa, con la herramienta fuzzy del *software* utilizado, lo que permite crear mapas de aptitud continua para cada criterio, variando entre los extremos de apto y no apto.

En esta fase, es importante la asignación de valores cuantitativos a las categorías correspondientes a cada criterio, ya que esta valorización incide directamente en el resultado de la evaluación. Posteriormente, mediante un procedimiento sencillo de modelado cartográfico, se obtiene el mapa de aptitud.

Es fundamental destacar que todos los mapas se multiplican por el mapa *booleano* de áreas urbanas actuales como restricción, asignando un valor de 0 a las áreas actualmente urbanizadas y 1 al resto. Esto se realiza para excluir del análisis las áreas ya consolidadas como urbanas que, debido a sus características físicas, podrían ser aptas para otros usos. Los factores y la restricción considerados para la obtención del mapa de aptitud urbana se derivan de los mapas de las variables seleccionadas y se detallan a continuación.

Distancia a áreas urbanas actuales: la aptitud para la expansión urbana disminuye al aumentar la distancia de las áreas urbanas actuales. Se establecen parámetros para que los 2 000 metros sean considerados como el umbral de máxima aptitud, disminuyendo gradualmente los valores a medida que se alejan del valor óptimo. Al adoptar este criterio, se tiene en cuenta la importancia de la compacidad de la ciudad como eje de la sostenibilidad urbana, favoreciendo la ampliación de servicios básicos a menor costo, debido a la proximidad. Para obtener este primer factor, se genera un mapa inicial de distancias euclidianas, el cual sirve como base para la creación del mapa de estandarización difusa, con valores en el rango de 0 a 255, aplicando la función sigmoïdal con decrecimiento monótono.

Distancia a red vial: la aptitud para la expansión urbana aumenta a menor distancia de las vías de comunicación principales. Este criterio favorecerá las áreas cercanas a la red vial como más adecuadas para el desarrollo urbano, estableciendo los 1 500 metros como la distancia óptima. Este criterio es fundamentalmente significativo en la localidad cabecera del Partido de Luján, por encontrarse conectada por una autopista directa a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), lo que favorece la conectividad con toda el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) y, por ende, se considera beneficioso localizarse cerca de estas arterias de conexión regional. Se genera un mapa de distancias, para luego aplicar un cálculo de estandarización difusa lineal decreciente.

Distancia a centros educativos: a partir de este criterio se considera que la aptitud para la expansión urbana es mayor cuando la distancia a los centros educativos es menor, considerando la importancia del acceso a servicios urbanos básicos. Por esto, se aplicó una función lineal con decrecimiento monótono, considerando el umbral de 1 500 metros.

Distancia a centros de salud: a partir de este criterio, se considera que la aptitud para la expansión urbana es mayor cuando la distancia a los centros de salud es menor, considerando la importancia del acceso a servicios urbanos básicos. Por esto, se aplicó una función lineal con decrecimiento monótono, considerando el umbral de 1 500 metros.

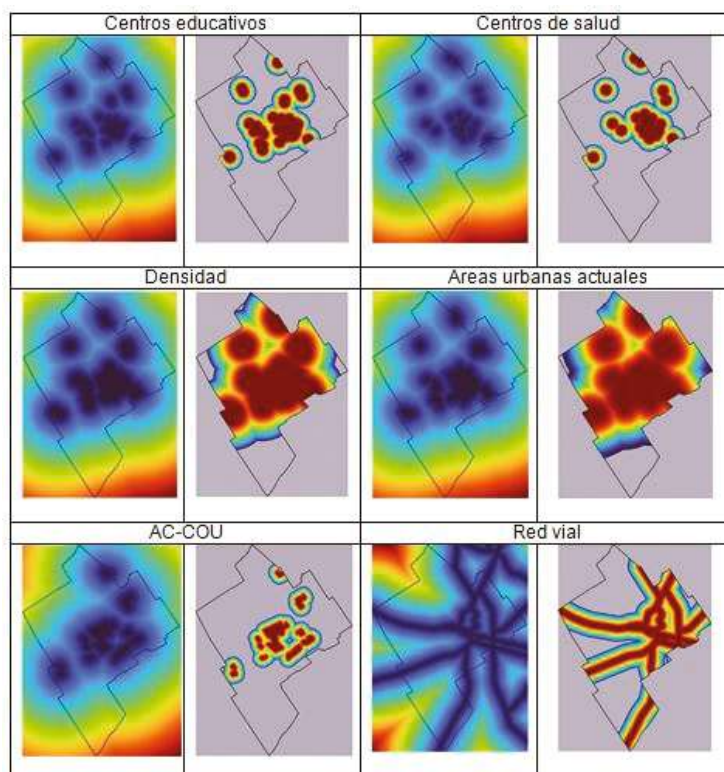
Densidad de población: este criterio considera que cuanto mayor es la densidad de población existe mayor probabilidad de crecimiento urbano en zonas contiguas a estas áreas. Para el cálculo de la densidad se utilizó la capa temática de radios censales, con el valor de densidad poblacional (considerando cantidad de habitantes y superficie). Luego se calcularon los centroides de cada radio censal para realizar un mapa de calor aplicando la densidad de Kernel para entidades de puntos calculando su densidad alrededor de cada celda, con un radio de 500 metros, ponderado por densidad poblacional. Finalmente, se aplicó una función lineal con decrecimiento monótono, considerando 1 000 metros de distancia.

Distancia a Áreas Complementarias (AC) del Código de Ordenamiento Urbano (COU): la aptitud para la expansión urbana es óptima cuando está dentro de las AC, consideradas en el COU vigente del partido de Luján (2019) con el código AC-RE1 (Áreas Complementarias Residenciales Extraurbanas 1)

que incluye las áreas destinadas a la localización de segunda residencia, prepara las condiciones para una futura expansión del área urbana y también se admite localización de urbanizaciones especiales y AC-RE2 (Áreas Complementarias Residenciales Extraurbanas 2), como áreas de posible expansión urbano-residencial, donde se contempla una primera subdivisión en quintas y grandes parcelas cuya geometría admite fraccionamientos posteriores y también se permite desarrollo de urbanizaciones especiales. La aptitud disminuye a mayor distancia de las AC, se aplicó una función lineal con decrecimiento monótono considerando 1 000 metros de distancia.

A continuación, se presenta la figura 7 con los factores considerados y procedimientos aplicados: *a)* cálculos de distancia en primera instancia y *b)* estandarización difusa con valores de 0 a 255.

Figura 7. Factores considerados – mapas de distancias y mapas difusos



Fuente: elaboración propia.

Área urbana actual: no se consideran en el análisis de aptitud las áreas que ya son urbanas, ya que por las características de esta cobertura, no se contempla su cambio de uso. En este caso se construye un mapa *booleano*, a modo de restricción, (figura 8) con 0 para las áreas urbanas (color negro) y 1 para el resto (color blanco).

Figura 8. Restricción considerada – mapa booleano



Fuente: elaboración propia.

Cada uno de los criterios utilizados en la EMC tiene un impacto directo en la planificación territorial y en la configuración futura del espacio urbano; por ejemplo, la proximidad a la infraestructura vial no sólo facilita la conectividad, sino que también influye en la demanda de servicios y en el

desarrollo de nuevos centros urbanos. La densidad poblacional, por su parte, es un indicador clave para prever la presión sobre los recursos y la necesidad de equipamiento urbano.

Además, los criterios normativos, como las Áreas Complementarias definidas en COU, juegan un papel fundamental en la regulación del crecimiento. Estas zonas pueden servir como espacios de transición entre lo urbano y lo rural, minimizando los conflictos de uso de suelo y favoreciendo una expansión planificada.

Es importante destacar que los criterios de aptitud urbana no deben considerarse de forma aislada, sino en su interrelación con otros factores socioeconómicos y ambientales. En este sentido, la integración de la EMC con SIG permite generar escenarios más precisos, donde se pueden evaluar distintas configuraciones espaciales y sus implicancias en la calidad de vida de la población.

Determinación de preferencias-ponderación de los factores

El paso siguiente corresponde a la definición de preferencias y pesos, a través del método AHP, disponible en el módulo *weightt* de Terrset. A partir de los juicios de valor de los criterios se realiza la matriz recíproca (tabla 3), considerando la escala de medida presentada en la figura 4.

Tabla 3. Matriz recíproca con factores considerados

	Área urbana	Densidad	Red vial	AC- COU	Centros educativos	Centros de Salud
Área urbana	1					
Densidad	5-Jan	1				
Red vial	3-Jan	3	1			
AC-COU	1	3	3	1		
Centros educativos	9-Jan	7-Jan	5-Jan	9-Jan	1	
Centros de salud	9-Jan	7-Jan	5-Jan	9-Jan	1	1

Fuente: Elaboración propia en el módulo *weightt* de Terrset.

Luego se obtiene el vector de prioridad (w_j), que representa el orden de prioridad de los criterios (tabla 4).

Tabla 4. Vectores de prioridad de los factores considerados

<i>Factor</i>	<i>Vector de prioridad (w)</i>
Área urbana	0.3521
Densidad	0.1165
Red vial	0.1596
AC-COU	0.3154
Centros educativos	0.0282
Centros de salud	0.0282

Fuente: resultado de aplicación del método AHP en módulo *weighth* de Terrset.

Finalmente, se realiza el cálculo de la RC, considerando los datos del IAM de matrices recíprocas cuadradas (tabla 1). Se obtiene un RC de 0.06. Es decir, inferior a 0.10 lo que indica que el resultado es consistente, por lo tanto, las ponderaciones de cada criterio quedan establecidas y se puede avanzar en el proceso de EMC.

Aplicación de la regla de decisión

El siguiente paso dentro de la EMC para la evaluación de la aptitud urbana consiste en aplicar una regla de decisión, que en este caso se trata de una técnica compensatoria aditiva, que es la sumatoria lineal ponderada.

La combinación lineal ponderada (WLC) es un procedimiento o técnica para la EMC, donde los criterios continuos estandarizados se combinan por medio de una suma ponderada. Es de los métodos más empleados por su sencillez y por ser fácil de implementar. Se calcula sumando el resultado de la multiplicación del valor de cada criterio por su peso, según la siguiente fórmula:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij}$$

donde:

r_i = la variable ponderada definida como objetivo.

w_j = el peso del criterio o factor j .

v_{ij} = el valor ponderado de la alternativa i en el criterio o factor j .

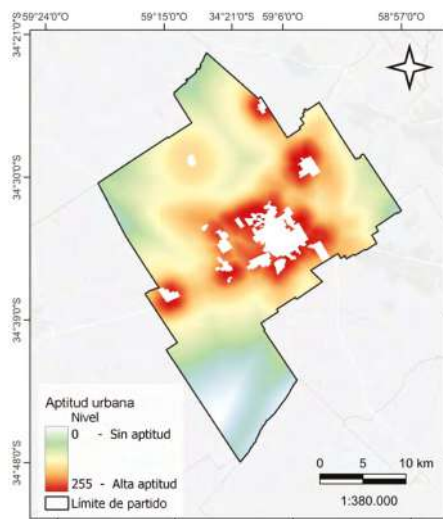
Se trata de una técnica que lleva la solución al extremo superior del triángulo de decisiones (figura 3) estratégicas donde el nivel de riesgo es medio y existe una máxima compensación entre los factores. En el *software* utilizado, la aplicación del WLC está disponible como una de las opciones en el módulo MCE (MultiCriteria-Evaluation). Utilizando los mapas difusos de cada uno de los factores y sus correspondientes pesos se realiza el procedimiento sencillo de modelado cartográfico:

$$\text{WLC} = (\text{Área urbana} \times 0.3521) + (\text{Densidad} \times 0.1165) + (\text{Red vial} \times 0.1596) + (\text{AC-COU} \times 0.3154) + (\text{Centros educativos} \times 0.0282) + (\text{Centros de salud} \times 0.0282).$$

Obtención del resultado

El resultado de la evaluación arroja el mapa de aptitud continua para expansión urbana en el partido de Luján, a partir de los 6 factores considerados y excluyendo del análisis las áreas que ya están consolidadas como urbanas en el área, como se observa en el mapa siguiente (figura 9).

Figura 9. Mapa de aptitud para la expansión urbana en el partido de Luján



Fuente: elaboración propia en QGIS 3.22.6.

Se obtienen los valores de superficie para las categorías de aptitud baja, media y alta, según el rango difuso considerado (tabla 5).

Tabla 5. *Categorías de aptitud por superficie*

	<i>Superficie (km²)</i>
Aptitud baja (0-85)	162
Aptitud media (85-170)	372.3
Aptitud alta (170-255)	191

Fuente: elaboración propia.

Discusión

Si bien el presente capítulo se centró en los aspectos teórico-metodológicos de la EMC, con una aplicación sencilla a modo de ejemplo, es innegable que la cuestión climática debe ser considerada en cualquier análisis territorial como una estrategia clave para garantizar ciudades más habitables, equitativas y preparadas para los retos del futuro. La magnitud y complejidad de los efectos del cambio climático hacen necesario su abordaje en los procesos de planificación urbana, ya que su impacto trasciende la dimensión ambiental e incide directamente en el desarrollo socioeconómico y la resiliencia de las ciudades frente a eventos extremos.

En el caso del Partido de Luján, para la planificación urbana se debe evaluar la compatibilidad de la expansión con la protección de áreas de valor ambiental, como los humedales del área. Incorporar estos factores en la EMC permitirá identificar zonas donde el desarrollo urbano pueda realizarse con menor impacto ambiental, asegurando un crecimiento más equilibrado y resiliente frente a los desafíos climáticos actuales. La sostenibilidad de los nuevos desarrollos urbanos dependerá en gran medida de la capacidad para integrar estos criterios dentro de los procesos de toma de decisiones espaciales.

El resultado obtenido revela la distribución espacial de las áreas propicias para el crecimiento o la expansión urbana en el partido de Luján, en tonos rojos. Las áreas con aptitud alta representan una superficie de 191 km². Se evidencia que las zonas con mayor aptitud, se encuentran adyacen-

tes o cercanas a las áreas urbanas existentes, indicando su conexión con la expansión de las áreas ya consolidadas. Este resultado está en concordancia con la regla de decisión aplicada, que priorizó la proximidad a las áreas urbanas actuales con mayor ponderación en la aplicación del método AHP.

Contiguas a la ciudad de Luján, se destacan vastas extensiones con alta aptitud para el uso urbano, asociadas a la expansión horizontal significativa del área. Esta expansión se puede relacionar con la potencial unión de la ciudad a la mancha urbana del Gran Buenos Aires. Por otro lado, 372 km² del partido presentan aptitud media, áreas destinadas principalmente a usos rurales mixtos de la tierra, como la agricultura extensiva, la ganadería y la frutihorticultura intensiva, pero con condiciones físicas óptimas para el desarrollo urbano.

En contraste, las zonas con baja aptitud para el uso urbano, que representan 162 km², están vinculadas principalmente a la combinación de áreas exclusivamente rurales y que se encuentran alejadas de las áreas urbanas existentes, como también de las principales vías de comunicación de la zona, lo que dificultaría la integración a los ejidos urbanos actuales.

Dado que se trata de una llanura, el uso del suelo urbano no enfrenta obstáculos significativos para su desarrollo, lo que implica que un gran porcentaje de la superficie pueda considerarse potencialmente apta para la expansión urbana.

Sin embargo, en esta aplicación exploratoria sólo se han considerado seis factores y sólo un limitante para excluir del análisis las áreas urbanas actuales, por considerarse que es un uso consolidado sin posibilidad de reversibilidad o cambio. En este sentido, es importante incorporar mayor cantidad de criterios —factores y limitantes— para mejorar la evaluación a futuro. Por ejemplo, poder incorporar limitantes vinculados a cursos de agua, áreas ribereñas y humedales existentes en el área permitiría obtener escenarios más restrictivos para la expansión urbana considerando las áreas que presentan aptitud para la conservación de la biodiversidad.

Además, este análisis espacial preliminar es el puntapié inicial para avanzar hacia la evaluación de otros objetivos vinculados a las actividades agropecuarias o las áreas propicias para la conservación, lo que permitiría analizar objetivos contradictorios a partir de la competencia espacial y la identificación de escenarios de potencial conflicto entre diferentes usos del

suelo en el partido de Luján que permitirían dar cuenta de la dinámica urbano-regional de esta área, donde se destacan las actividades vinculadas a la producción agrícola extensiva y la producción frutihortícola intensiva en áreas periurbanas, áreas ribereñas y de humedales, que el crecimiento urbano de los últimos años ha estado presionando fuertemente, afectando particularmente las zonas de interfase urbana-rural en el área con suelos más productivos del país, que actualmente se han convertido en objeto de especulación inmobiliaria para la expansión urbana de tipo dispersa, con emprendimientos privados. A partir del modelado espacial basado en técnicas de EMC multobjetivo con SIG se podría avanzar en esta línea que complejizaría el análisis.

Conclusiones

La importancia de realizar una aplicación de análisis espacial basada en la EMC, como la presentada en este capítulo, radica en su capacidad para analizar el espacio geográfico y respaldar los procesos de ordenamiento territorial. En este caso, conocer las áreas más propicias para la expansión o desarrollo urbano es importante para la toma de decisiones en el ámbito de la planificación urbana, especialmente en ciudades de tamaño intermedio que han experimentado un notable dinamismo en los últimos años.

En este sentido, técnicas tan sencillas como el modelado cartográfico basado en EMC permiten obtener resultados concretos que sirven de sustento para la toma de decisiones espaciales.

La selección y análisis de variables en formato cartográfico posibilitaron la definición de diversos criterios espaciales para la aplicación de la EMC apoyada por SIG. El objetivo principal fue determinar niveles de aptitud para la expansión urbana en el partido de Luján. En el contexto del partido de Luján, donde la expansión urbana debe considerar múltiples factores interrelacionados (infraestructura, accesibilidad, densidad poblacional y normativas de uso del suelo), el método AHP demostró ser apropiado para la ponderación de los criterios, respaldado por una validación estadística aceptable.

Esto permitió avanzar en la suma lineal ponderada de los criterios para cumplir con el objetivo locacional establecido.

El resultado cartográfico final no sólo proporciona la capacidad de identificar áreas con diversas aptitudes para la expansión urbana, sino que también facilitaría la realización de otros procedimientos dentro del ámbito del modelado cartográfico. Esto puede lograrse mediante la comparación y superposición con mapas que consideren aptitudes para otros usos, lo que permitiría identificar áreas que podrían enfrentar conflictos futuros entre distintos usos de suelo.

Es importante destacar que las técnicas de EMC han emergido como una de las líneas de aplicación más interesantes de la tecnología SIG, sirviendo como herramienta de apoyo en los procesos de ordenamiento territorial, especialmente durante la fase de planificación territorial; esto se debe a su capacidad para realizar diagnósticos y propuestas de intervención concretas con base científica.

En este sentido, este ejemplo simple de aplicación busca valorizar estas aplicaciones del análisis espacial con SIG, al demostrar su utilidad y versatilidad para administrar datos geográficos, combinar variables sociales y físicas, permitiendo el abordaje de problemáticas socioespaciales complejas que requieren de un análisis multidimensional al que se puede llegar por medio de estudios sencillos, evidenciando que el enfoque aplicado de la geografía es fundamental para generar conocimientos relevantes y útiles para la sociedad.

Referencias

- Anselin, L. (1999). The Future of Spatial Analysis in the Social Sciences. *Geographic Information Sciences*, 5 (2), 67-76.
- Buzai, G. D. y Baxendale, C. (2011) *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Tomo 1*. Lugar Editorial.
- Buzai, G. D. y Montes Galbán, E. (2020). Megaciudad Buenos Aires: cartografía de su última expansión y conurbación mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales nocturnas. *Revista Cartográfica*, (100) 215–238. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i100.667>
- Buzai, G. D. y Principi, N. (2017). Identificación de áreas de potencial conflicto entre usos del suelo en la cuenca del río Luján (Argentina). *Revista Geográfica de América Central*, 3(59), 91-124. <https://doi.org/10.15359/rgac.3-59.4>
- Chadwick, G. (1973). *Una visión sistémica del planeamiento*. Gustavo Gili.

- Chorley, R. y Haggett, P. (1967). *Models in geography*. Methuen.
- Da Silva, C. y Cardozo, O. (2015). Evaluación multicriterio (EMC) y sistemas de información geográfica aplicados a la definición de espacios potenciales para uso del suelo residencial en Resistencia, (Argentina). *Geofocus* (16), 23–40. <https://geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/445>.
- DeMers, M. (2002). *GIS Modeling in Raster*. John Wiley.
- Eastman, J. R.; Kyem, P. A.; Toledano, J y Jin, W. (1993). *GIS and Decision Making*. United Nations Institute for Training and Research.
- Gómez Delgado, M. y Barredo Cano, J. I. (1996). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*. Ra-Ma.
- Gómez Orea, D. (2008). *Ordenación Territorial*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Humacata, L. (2017). *Análisis espacial de los cambios de usos del suelo en partidos de interfase urbano-rural de la Región Metropolitana de Buenos Aires, en el periodo 2000-2010, mediante la aplicación de Tecnologías de la Información Geográfica*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires]. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.17046.65601>
- Jankowski, P. (1995). Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9 (3), 251-273. <https://doi.org/10.1080/02693799508902036>
- INDEC (2023). *Censo nacional de población, hogares y viviendas 2022: resultados provisionales. 1a. ed.* Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de la República Argentina.
- Isard, W. (1969). *General Theory: Social, Political, Economic, and Regional, with Particular Reference to Decision-making Analysis*. MIT Press.
- Naciones Unidas–Habitat (2016). *Urbanization and Development: Emerging Issues. World Cities Report 2016*. Naciones Unidas.
- Malczewski, J. (2002). Fuzzy Screening for Land Suitability. *Analysis Geographical & Environmental Modelling*, 6 (1), 27-39.
- Malczewski, J. y Rinner, C. (2015). *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Sciences*. Springer.
- McKenna, C. K, (1980). *Quantitative methods for public decision making*. McGraw-Hill.
- Morales Ramírez, L. y Pineda Jaimes, N. (2023). “Determinación de áreas de potencial conflicto entre usos del suelo en el Municipio de Villa Guerrero, Estado de México”, en *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*, 15 (25), 1-22. <https://revistageo-sig.wixsite.com/geosig/geosig-25-2023>
- Moreno Jiménez, A; Buzai G. D. y Fuenzalida Díaz, M. (2012). *Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones en diagnósticos territoriales y decisiones geoambientales*. Ra-Ma.
- Naciones Unidas. (2016). *Objetivos del desarrollo sostenible 17 objetivos para transformar el mundo*. Naciones Unidas. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities>
- Páez Gallego, J. (2015). Teorías normativas y descriptivas de la toma de decisiones: un modelo integrador. *Opción*, 31 (2), 854-865.

- Principi, N. (2021). Evaluación multicriterio aplicada a la expansión urbana en Luján (Buenos Aires, Argentina). *Anuario de la División Geografía*, 15, 1-14. <https://adgun-lu.wixsite.com/anuario-geografia/anuario-15-2021>
- Principi, N. (2017). Avances para la obtención del mapa de aptitud agrícola en la cuenca del río Luján con evaluación Multicriterio. *Red Sociales*, 4 (5), 157-167.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Proces*. Mc Graw Hill Press.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process: what it is and how it is used, in *Mathematical Modelling* 9 (3-5), 161-176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Tomlin, C. D. (1990). *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Englewood Cliffs-Prentice Hall.
- Toskano Hurtado, G. (2005). *El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores*. [Tesis de Licenciatura en Investigación de Operaciones, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú]. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/basic/toskano_hg/contenido.htm
- UNFCC. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Naciones Unidas, Río de Janeiro.
- Wong, N. y Yu, C. (2005). Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*, 29, 547-558.

3. Análisis espacial con autómatas celulares, aplicado al crecimiento de ciudades

RICARDO ELIÚ LOZOYA-PONCE*

EDUARDO JIMÉNEZ-LÓPEZ**

ROMÁN SÁNCHEZ DÁVILA***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.279.03>

Resumen

En este trabajo se muestra la complejidad del crecimiento urbano y su modelización mediante el uso de Autómatas Celulares (AC). Se destaca la importancia de comprender la sostenibilidad urbana para planificadores y gobiernos, especialmente en ciudades de más de un millón de habitantes. Los autómatas celulares son una herramienta eficaz para simular y predecir la transformación urbana, permitiendo mejorar la comprensión de la dinámica espacio-temporal del crecimiento urbano, además se integran a sistemas de información geográficos (SIG), para facilitar su manejo. El modelo opera con reglas de transición deterministas, que son evaluadas en cuanto a su capacidad para representar fenómenos urbanos realistas y su potencial para describir la planificación urbana. También se destacan las limitaciones e incertidumbre inherentes a los modelos de AC deterministas, así como la necesidad de incorporar factores adicionales que proponen mejoras en la metodología y una mayor integración de los AC con otros modelos para avanzar en la planificación urbana y la inteligencia territorial.

* Doctor en Ciencias Aplicadas. Profesor-investigador del Tecnológico Nacional de México y el Instituto Tecnológico de Chihuahua, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9927-2011> ; correo: ricardo.lp@chihuahua.tecnm.mx; Scopus: 55625416500

** Doctor en Ciencias Aplicadas. Profesor-investigador de la Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1883-3890>:

*** Doctorando en Urbanismo. Profesor del Tecnológico Nacional de México-Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2292-4119>

Palabras clave: *Crecimiento urbano, Autómatas Celulares, reglas de transición, dinámica espacio temporal.*

Introducción

El crecimiento urbano ha derivado en cambios sociales, económicos y tecnológicos, particularmente en ciudades que tienen más de un millón de habitantes. Regularmente, conduce a un desarrollo lento en los servicios básicos que son destinados para la población y limita la capacidad de carga de las ciudades. Comúnmente en las periferias de las ciudades causa consecuencias negativas para el dinamismo del desarrollo urbano y deteriora el medio ambiente a escalas inusuales (Burak *et al.*, 2017).

Las investigaciones sobre los mecanismos del crecimiento urbano son relevantes para los planificadores, gobiernos y tomadores de decisiones que tratan de mejorar la comprensión de la sostenibilidad urbana. Los Autómatas Celulares (AC) es una herramienta que ayuda a entender la complejidad de los sistemas urbanos. Es una técnica que potencializa las simulaciones para predecir y comprender la transformación urbana en el espacio y el tiempo (Musa *et al.*, 2017).

La técnica de AC es poco utilizada en México por las partes interesadas en pronosticar y evaluar el potencial sobre los beneficios sociales y resultados ambientales del desarrollo urbano antes de su implementación (Jiménez-López *et al.*, 2018). Esta técnica otorga información sobre la dinámica urbana y las complejas relaciones entre los cambios urbanos, el desarrollo socioeconómico y los sistemas sustentables (Li *et al.*, 2017).

Los AC son un modelo dinámico discreto con ventajas únicas para simular problemas complejos no lineales (Jiménez-López, 2022). Data de la década de 1940, cuando S. Ulan y J. von Neumann consideraron la posibilidad de una máquina autorreplicable. Wolfram, en 1984, demostró las capacidades que tiene el análisis de AC para modelar procesos naturales complejos y generar cambios a través de interacciones locales entre componentes vecinos.

La aplicación del modelo de AC genera espacios celulares; con esto, la investigación geográfica incorporó por primera vez a los sistemas de infor-

mación geográfica (SIG) que llevaron a la simulación de situaciones urbanas del mundo real. (White *et al.*, 2015).

La creciente popularidad de los AC en el modelado urbano podría atribuirse en gran medida a su simplicidad, flexibilidad, controlabilidad y capacidad para incorporar el espacio y el tiempo en los procesos de desarrollo urbano. Los AC puede simular sistemas urbanos no lineales por medio de reglas simples que pueden funcionar con datos de sensores remotos y SIG (Musa *et al.*, 2017). Se afirma entonces que la técnica de AC es más conveniente a utilizar en comparación con modelos basados en agentes, metodologías desarrolladas en las últimas décadas (Yin *et al.*, 2018).

La integración de AC con SIG proporciona una herramienta poderosa para realizar cálculos complicados basados en datos locales produciendo mejores resultados que las ecuaciones diferenciales (Musa *et al.*, 2017). Por otro lado, los AC en el modelado urbano no generan errores en la entrada de los datos espaciales, por ello crea certidumbre inherente en el manejo de la cantidad de datos (Liu *et al.*, 2021).

Los AC simulan la expansión urbana, se convierten en una técnica espaciotemporal que aborda diversos problemas. En este trabajo se hace una descripción general de los conceptos básicos y las modificaciones que al uso de AC para el modelado urbano. Por ende, el objetivo es proporcionar una visión general de la definición, modificación y aplicación de AC en la planificación urbana desde las perspectivas de celda, espacio celular, vecindad, paso de tiempo y regla de transición; tácitamente, se realiza la recopilación de los datos requeridos.

Metodología y recopilación de datos

Los componentes básicos de AC son espacio celular, celda, vecindad, pasos de tiempo y reglas de transición, donde cada componente tiene implicaciones geográficas que se aprovechan para hacer la unión de dos disciplinas (Feng y Tong, 2020). El espacio celular representa el espacio geográfico bidimensional compuesto por celdas regulares. Los estados de las celdas se pueden decir que son las condiciones iniciales del sistema que representa a los diferentes usos de suelo. Una de las partes fundamentales del modelo de

AC son las reglas de transición, cada celda cambia constantemente de acuerdo con su estado y la regla de transición con el paso del tiempo discreto. (Jiménez-López *et al.*, 2018)

El espacio celular es una cuadrícula regular compuesta de celdas cuadradas y particularmente adecuadas para el procesamiento por computadora y compatible con datos de los mapas generados. El espacio celular puede ser tridimensional para representar el crecimiento vertical de las áreas urbanas (Jiménez-López y López-Rivera, 2023). Para aproximar los AC a procesos de simulación más reales se necesita modificar dos componentes como son el espacio de celda, que puede basarse en unidades espaciales irregulares; generalmente se representa como un polígono que refleja el uso de la tierra, el tamaño de la población y las condiciones económicas. Las celdas células, parcelas o bloques regulares proporcionan una buena representación de la realidad, pero conducen a definiciones complicadas de vecindad. El espacio de las celdas normalmente se propone homogéneo en el AC determinista, lo que indica celdas idénticas y exclusivas caracterizadas por su estado; sin embargo, la gran influencia de los atributos en los cambios de uso de la tierra, como como la accesibilidad al transporte o las condiciones físicas, varían la idoneidad de las diferentes celdas para determinados usos de suelo (Valdez, 2019)

El segundo componente es la vecindad, suele haber dos tipos de vínculo. En AC determinista, la vecindad es isotrópica y homogénea para cada celda y consta de un conjunto finito de celdas geométricamente más cercanas (i. e. vecindad de Neuman y Moore). En aplicaciones urbanas, se adopta una vecindad extendida para considerar los efectos del vecindario en los efectos de las entidades geográficas (White *et al.*, 2012). El tamaño del vecindario puede extenderse a una distancia especificada y se suele introducir una ponderación según la distancia, para considerar el efecto de la disminución de la distancia. Si se basa en unidades irregulares, las unidades adyacentes dentro de una cierta distancia o grado de proximidad se utilizan para representar un vecindario (Xia *et al.*, 2018).

La modificación que se aplica es la vecindad no estacionaria, que define diferentes espacios de vecindad para células que son tomadas al azar en una forma discreta (Jiménez-López *et al.*, 2018). Como núcleo del modelo AC, las reglas de transición generalmente implican modificaciones sustanciales,

considerando las particularidades y complejidad de aplicaciones específicas. Las reglas de transición originales sólo dependen de los estados de una célula y sus vecinos cercanos. Dado que los procesos urbanos están influenciados por numerosos factores, se modifican las vecindades para considerar los efectos externos. Los AC tienen la característica de ser flexibles, las reglas de transición se pueden definir de diferentes maneras según las preferencias de cómo se modela la ciudad.

La aleatoriedad e incertidumbre del crecimiento urbano puede reflejarse en la estructura de la simulación. En AC determinista, las reglas de transición son estáticas y las mismas en cada paso del tiempo. Sin embargo, en un espacio lineal o unidimensional las células adyacentes sólo pueden ser tres, las que necesariamente comparten frontera y que generan ocho combinaciones posibles. El número de reglas de transición o de instrucciones posibles para la evolución de un AC determinista de tres bits en un espacio lineal generan en un factor de 2^n , con $n=8$ que otorga 256 reglas de transición posibles para simular la evolución de un modelo de AC de tres bits en el espacio lineal (Padilla *et al.*, 2015).

Los pasos de tiempo en una AC determinista son discretos, lo que supone que el crecimiento urbano ocurre al mismo tiempo. El estado futuro en la cuadrícula depende de las reglas de transición y de su estado en el período anterior. En este trabajo se propone no realizar la segregación de los datos en el primer renglón.

La clave es encontrar la regla de transición que mejor simule el proceso de expansión urbana para cada ciudad que participa en el experimento, de entre el conjunto de 256 reglas de transición posibles. Para lograrlo, se requieren por lo menos dos cosas: *i*) probar todas las reglas de transición (las 256); y *ii*) contar con indicadores de bondad de ajuste que valoren la similitud de los resultados del modelo de AC con la realidad observada, para medir la precisión de cada regla de transición. En este trabajo se estiman ambos parámetros.

Un AC determinista se puede expresar matemáticamente en la ecuación:

$$\gamma = (d, S, H, \delta)$$

donde d representa el espacio n — *dimensional*, S el conjunto de estados, H el espacio de vecindad y δ las reglas de transición. Los AC deterministas son fáciles de combinar con otros métodos, técnicas y modelos para mejorar las capacidades de simulación en aplicaciones específicas (Gounaridis *et al.*, 2019).

La naturaleza sencilla de AC determinista limita la capacidad de representar en el mundo real fenómenos geográficos. En la adaptación del modelo en aplicaciones urbanas, se deben incluir las particularidades de los procesos geográficos para representar heterogeneidad geográfica, que conduce a la relajación de los componentes originales de AC. Por ejemplo, las características geográficas del vecindario pueden ser incorporado en AC que simplifica las estructuras basadas en reglas. Al integrar las bases de datos SIG, vuelve más poderosa la simulación de la estructura urbana por la gran cantidad de datos que se manejan en una imagen de satélite de una ciudad, todo esto desarrollado para formular escenarios de planificación.

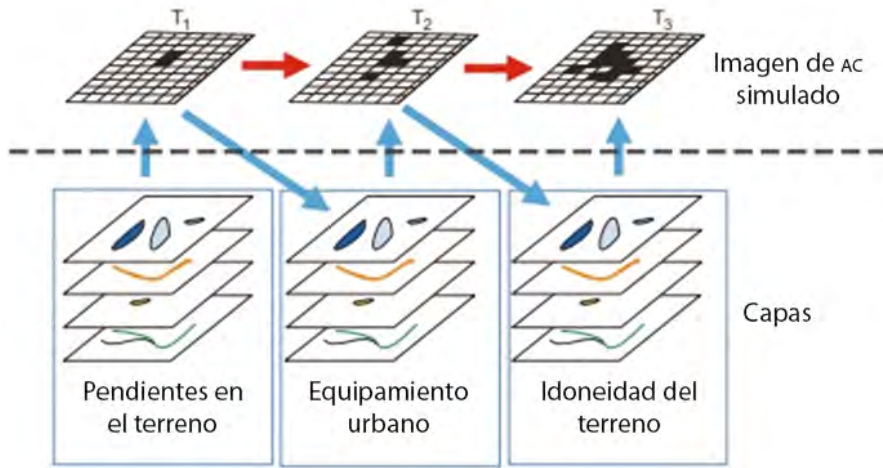
Se supone que la evolución de la ciudad se aproxima a la realidad, ciudades que están influenciadas por una serie de factores que son posibles de introducirse a la simulación, tales como pendientes del terreno, leyes de construcción (i. e. zonas donde no es posible construir), zonas restringidas para recargas acuíferas, zonas donde la elevación del terreno es mayor a 30 grados, probabilidad de transición, entre otros muchos factores. Se recomienda utilizar algunos factores o restricciones para regular la simulación y mejorar el rendimiento del modelado.

Figura 1. Partes fundamentales de AC en la regla de transición

Célula en la vecindad ($x-1, y-1$)	Célula central (x,y)	Célula en la vecindad ($x+1, y+1$)
---	-----------------------------	---

Fuente: elaboración propia.

Al juntar AC con el Sistema de Información Geográfica se desarrollan escenarios de planificación muy importantes y se otorga información valiosa. Dependiendo de la regla de transición, la evolución de la ciudad está influenciada por una serie de factores complicados que pueden definirse en niveles locales. Se debe hacer notar que deben utilizarse algunas restricciones para regular la simulación y mejorar el rendimiento del modelo pro-

Figura 2. Modelo de AC determinista e imagen base de ciudad en estudio

Fuente: elaboración propia.

puesto. Sin restricciones, la simulación urbana generará patrones habituales basados en tendencias históricas.

En las últimas décadas, este tipo de modelos AC unidos a SIG puede reflejar consideraciones ambientales y de desarrollo sostenible. Al modelo AC determinista se le pueden agregar factores importantes para la formación de patrones idealizados, donde se toma en cuenta no sólo la influencia de los estados vecinos, sino también una serie de factores económicos y medioambientales. Estas limitaciones pueden incluir la idoneidad ambiental, las formas urbanas y densidad de desarrollo (Jiménez-López *et al.*, 2018).

Evaluación crítica de metodologías en el contexto del crecimiento urbano

A pesar de este desarrollo, aún no se tiene un consenso en la comunidad científica respecto a los métodos a utilizar en el modelado del crecimiento urbano, ya que no existe una opinión generalizada de las normativas del desarrollo urbano. El comportamiento urbano es el resultado de procesos complejos y generalmente no lineales, donde cada urbe tiene un conjunto

de caracteres particulares, es decir, que son no estacionarios, que responden a un contexto específico, como dimensión espacial entre los procesos y a problemas multiescala (McGarigal *et al.*, 2018).

Lo anterior hace necesario el abordaje complejo del problema, lo cual se traduce en el análisis de distintas variables: económicas, sociales y políticas, que conviven en diferentes escalas temporales y que condicionan procesos como: el tamaño de la urbe, la forma de la ciudad y la satisfacción de necesidades para el desarrollo y, por consecuencia, el manejo de la aleatoriedad. El crecimiento urbano es también un proceso marcadamente espacial. Las normas políticas adoptadas por los gobiernos y las especulaciones privadas inmobiliarias provocan una gran heterogeneidad espacial. Diferentes zonas del área metropolitana tienen grados de atractivo distintos, lo que deja su impronta en forma de nudos de expansión, tejido abandonado, infraestructuras infrautilizadas o mala integración de este tipo de entornos (Garrocho *et al.*, 2020).

Los avances en modelos computacionales y en los métodos de análisis han permitido la demostración matemática de que modelos de este tipo están directamente relacionados con mecanismos similares de la ciudad real. Los AC tienen un carácter espacio-temporal que en cada instante de tiempo predeterminado se representa un estado espacio-temporal a partir del anterior. Destacamos que este último promueve un modelamiento flexible. La principal ventaja deriva de su paralelismo y se deduce del hecho de que, a través de una regla sencilla, el AC sea capaz de manejar razonablemente bien la divergente situación de las múltiples entidades locales aun cuando estas entidades interactúan de distintas formas y tiempos (Jiménez-López *et al.*, 2018).

Las fortalezas de los AC en el modelado del crecimiento urbano se cumplen en diferentes aspectos: *a)* pueden modelar convenientemente la necesidad de disposición espacial de los agentes, en nuestro caso, píxeles de la imagen: esta necesidad lleva implícitamente a la existencia de un crecimiento por unidades de nuevo uso, incluso también a la regeneración de zonas con mayores posibilidades de accesibilidad (por ejemplo, habría ciertas posiciones de la malla con mayores posibilidades de ser zonas inundables de la mancha urbana, con ello valores inmobiliarios diferentes, llegando a ser un fenómeno especulativo) (Garrocho *et al.*, 2021). *b)* la simpleza general

del modelo, junto a la existencia de un número reducido de parámetros conduce a que los nuevos espacios vacíos se crean a continuación de los ya ocupados, de forma isotrópica. Si consideramos que la célula por medio de una intervención aleatoria dispone de una serie de direcciones posibles, precisa verificar si hay espacio libre en las celdas/células vecinas que respondan a sus criterios; si no es así permanecerá en la actual un determinado tiempo antes de disponerse a intentar buscar otro espacio más factible. A escala urbana, la rezonificación y los planes de construcción suelen inducir los cambios espaciales de los que puede depender gran parte del crecimiento. El proceso urbanístico presenta una complejidad imposible de ser tratada con las herramientas del análisis econométrico que demande una información concreta (Jiménez-López y Cadena, 2024).

Las debilidades de los Autómatas Celulares en el modelado del crecimiento urbano, se identifica como aquellos relacionados con la definición de falta en la concepción de algunas reglas de comportamiento. Otra debilidad es la identificación de problemas y limitaciones derivados del empleo de algunos factores seleccionados. Por último, algunas proyecciones que insinúan reformulaciones del modelo, así como la posibilidad de establecer relaciones con otros modelos de crecimiento urbano (Jiménez-López, 2018).

Las metodologías alternativas al modelado con AC se centran en enfoques que responden a la falta de información y modelado de procesos dentro de las comunidades locales donde la información es limitada. Esto se encuentra en la modelación econométrica o estadística del crecimiento, demanda de suelo, cambio de uso del suelo; el modelado de relaciones o modelos espaciales, que consideran interacciones espaciales explícitas, generalmente con la ayuda de SIG. Por otro lado, están los enfoques hedónicos que usan información zonal o de vecindad con respecto al entorno que los rodea, información de vecindad o barrio específico, influencia del momento de ciertas actividades. El tercer acercamiento es el modelado basado en agentes. Este resulta ser una forma de modelación fuertemente fundamentada en los aspectos teóricos. Provee al análisis la introducción de sistemas complejos encontrados en la realidad y ofrece la posibilidad de derivar procesos explicativos y no sólo descriptivos del desarrollo urbano. Los sistemas multi-agente permiten al investigador explicitar las localizaciones, atributos

especiales y reglas de decisión, las cuales cobran interacciones entre agentes y el entorno (Jiménez-López y Cadena 2024).

Recopilación de datos y calibración del modelo

Los AC deterministas normalmente requieren una gran cantidad de datos. Los datos de teledetección se utilizan a menudo para monitorear, medir las alteraciones y características de los cambios de uso del suelo. Las imágenes son obtenidas mediante teledetección de mapas de uso de la tierra. Con diferentes tiempos de la misma área se puede utilizar para la calibrar, validar y realizar simulaciones del modelo. Además, se le pueden agregar factores con las redes de tráfico, los atributos naturales (i.e. pendientes en el terreno) y otros

Los factores físicos se utilizan comúnmente para evaluar la idoneidad de la tierra para el desarrollo. Los planes de uso de la tierra pueden proporcionar información sobre el desarrollo de la tierra. Muchos estudios han utilizado datos socioeconómicos, como la densidad de población, para producir resultados de simulación más realistas.

La calidad de los datos de estas fuentes de entrada es una preocupación en las aplicaciones de AC determinista (Aburas *et al.* 2016). Se adopta la clasificación semi-supervisada para clasificar las imágenes en diferentes tipos de uso del suelo, es decir urbano y no urbano. En el software SIG se utilizan herramientas para visualizar mapas con diferentes resoluciones espaciales para análisis comparativos.

En este trabajo se utilizan cuatro etapas enfocadas a la generación del mapa sobre el área de estudio. El primero paso es obtener la imagen, que es la ubicación de la imagen en formato raster (i.e. imagen en píxeles), determinando sus características, así como los repositorios donde se puede descargar. El segundo paso es el preprocesamiento, que realiza correcciones sobre las imágenes: radiométricas, geométricas y atmosféricas, lo que elimina los errores producidos en el momento de la captura. El tercer paso es la combinación de bandas espectrales, que es la parte fundamental de una imagen de satélite, destacando la zona de interés, área urbana. La combinación de las bandas se realiza mediante una herramienta codificada en el lenguaje de programación Python con el método Brovey que realiza opera-

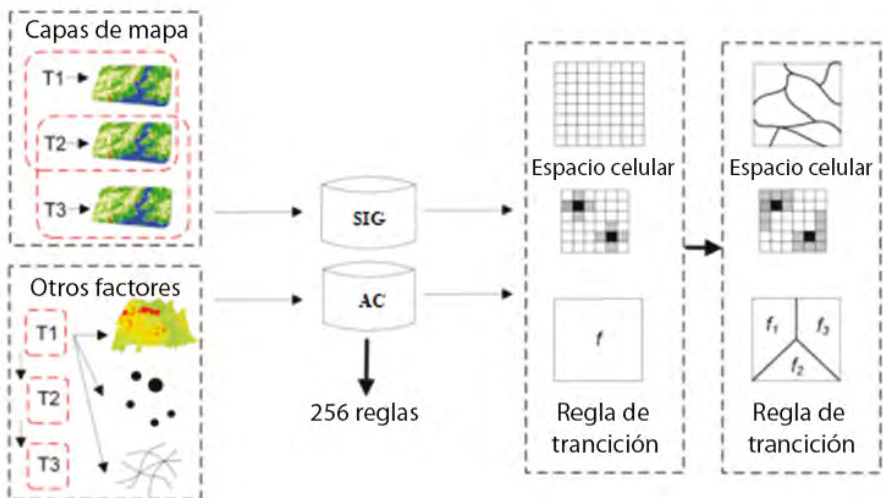
ciones entre las diferentes bandas de baja resolución. El resultado se produce multiplicando las bandas pancromáticas previamente normalizadas como se muestra en la ecuación:

$$B_i = \frac{B_i}{B_1 + B_2 + \dots + B_n} (PANC)$$

Donde representa el número de bandas espectrales que se combinan pueden ser $i=1,2,\dots,n$ y PANC son las bandas pancromáticas. La cuarta etapa es la clasificación, donde se realiza una separación de clases según los diferentes tipos de áreas presentes en la imagen satelital: área urbana, vegetación, agua, entre otras. Esta etapa genera imágenes binarias que son entradas para la AC.

La utilización de AC determinista puede proporcionar resultados significativos, especialmente para la planificación urbana, debido a errores inherentes e incertidumbre. En general, considerando los dos aspectos anteriores, el modelo se puede describir con el diagrama de flujo que se muestra en la Figura (3).

Figura 3. Pasos de modelo de AC determinista



Fuente: elaboración propia.

Aplicación de AC determinista en la planificación urbana

El desarrollo de AC para aplicaciones urbana y regional está considerablemente influenciado por el uso previsto y la funcionalidad del modelo. Se trata de aplicar el modelo de AC determinista para explorar la complejidad espacial, probar teorías e ideas urbanas y como herramienta de planificación de soporte (ver figura 4).

Para explorar la complejidad espacial, el modelo de AC determinista se utiliza para avanzar en la comprensión de la ciudad de Toluca-México, que se observa como un sistema complejo, adaptativo y dinámico. Como todo modelo es perceptible a limitaciones en el formalismo AC, que se requiere para el modelo aplicado en la exploración de los principios que rigen el desarrollo urbano espacial. AC es la combinación de una estructura espacial, un conjunto de estados y reglas de transición donde se propone la idea principal de este trabajo.

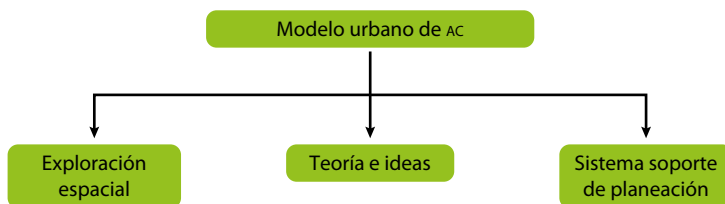
La aportación que se realiza tiene una idea detrás de AC que es encontrar elementos simples como la complejidad en la ciudad y comparar estos elementos con modelos generados en el mismo sistema, realizar la simulación de las 256 reglas de transición, estas reglas se pueden generar con tres bits (i.e. los bits vecinos a sus lados) y obtener que regla simula mejor a la ciudad.

Los AC se tomaron como una herramienta bien conocida por sus elementos para mostrar cómo se puede producir el desarrollo espacial a partir de reglas simples. En varios trabajos que se han realizado la ciudad de Toluca ha mostrado su gran valía para explorar la complejidad espacial, se ha tratado de ajustar las investigaciones al desarrollaron con la teoría fractal, caos, no linealidad, gráficos por computadora y complejidad (Jiménez-López *et al.*, 2018).

AC se puede utilizar para probar teorías e ideas de desarrollo urbano, examinando los roles de la complejidad en la dinámica impulsora de los procesos urbanos, como la expansión urbana, la difusión, el policentrismo, entre otras. Encontrar la mejor regla de transición que describa el crecimiento urbano, esto significa encontrar la mejor relación de vecinos cercanos que describa el crecimiento de la ciudad. Es la clave para desarrollar vínculos estrechos y directos entre las zonas dentro de la ciudad.

Las reglas de transición derivadas de las teorías urbanas pueden ayudar a explorar varias ideas hipotéticas sobre las ciudades. Las relaciones complejas entre los procesos físicos, socioeconómicos y los entornos urbanos se han explorado como la ecología, el diseño y la sociología urbanas (Batty 1998; Barredo *et al.*, 2003). Sin embargo, los modelos AC en la teoría urbana a menudo se preocupan con detalles sobre cómo construir el modelo, pero no explican las teorías que pretendían desarrollar y no llegan a un avance significativo (Torrens y O'Sullivan, 2001). El uso de modelos de AC urbana como sistemas de apoyo a la planificación requiere modificaciones como se expresa en la figura 4.

Figura 4. Aplicaciones potenciales del modelo AC determinista



Fuente: elaboración propia.

Dos aplicaciones mostradas en la figura 4 están encaminadas a producir resultados más realistas y relevantes con la ayuda del modelo de AC en la planificación, gestión y políticas urbanas. Estos modelos de AC sirven como herramientas de apoyo en la inteligencia territorial que pueden ayudar a los gobiernos, planificadores y partes interesadas a evaluar los beneficios sociales y las consecuencias ambientales y ecológicas de los diferentes objetivos, opciones y políticas de planificación.

Estos tipos de modelos de AC determinista, incluyendo los límites del crecimiento urbano, la evaluación de opciones de planificación urbana y la prevención del desarrollo ilegal en las periferias (Xia *et al.*, 2020) utilizan los siguientes conceptos que son utilizados en la investigación; 1) construir una línea base simulación y predicción del crecimiento; 2) evaluar el desarrollo existente en comparación con desarrollo óptimo; 3) simular alternativas de

desarrollo, de acuerdo con diferentes objetivos de planificación para ayudar al proceso de planificación urbana.

La planificación urbana y la inteligencia territorial van de la mano, se han convertido en una parte importante de la planificación territorial para delimitar el crecimiento de la ciudad. El objetivo es garantizar un crecimiento urbano inteligente, que pueda aumentar la densidad de servicios urbanos y proteger los ecosistemas naturales circundantes. Se ha tratado de introducir elementos importantes en el diseño de planes de uso de suelo en ciudades mexicanas.

Las ciudades en México necesitan frenar su caótica expansión urbana mediante la delimitación de dónde puede crecer y dónde no, para sostener las reservas de tierras agrícolas que cada vez son menores. La inteligencia territorial debe comprender el mecanismo de la dinámica urbana y considerar varios factores geográficos. Estos modelos pueden ayudar a los planificadores a delimitar la futura expansión urbana desde una perspectiva de optimización espacial. Tradicionalmente, los modelos de evaluación de la idoneidad del uso de la tierra proporcionan una forma sencilla de delimitar el crecimiento de la ciudad (Chettry y Surawar, 2021).

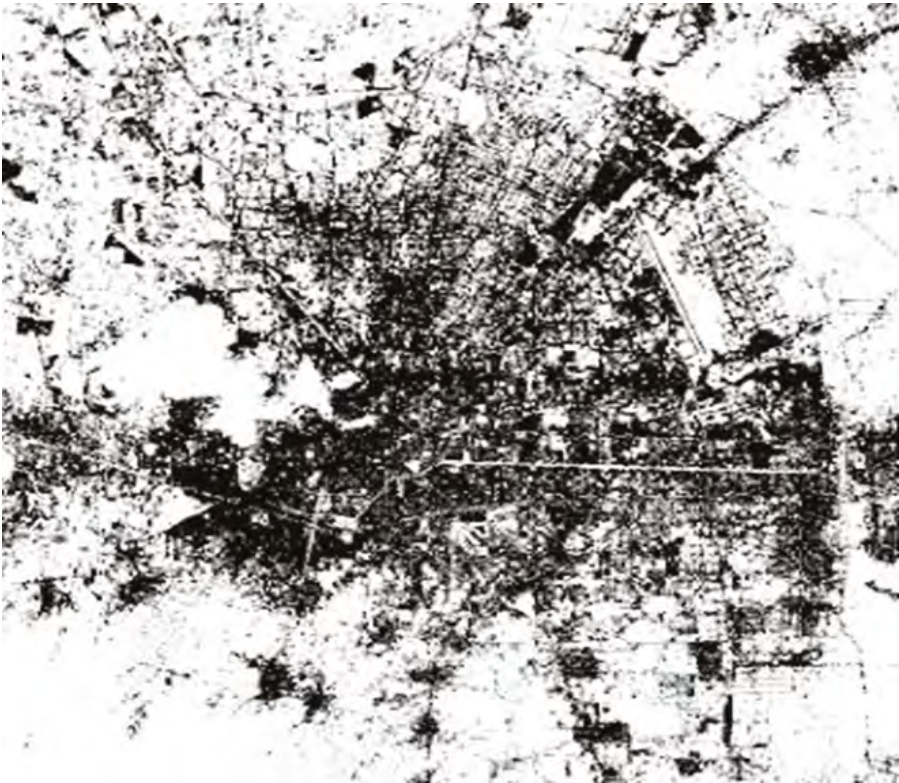
Un problema importante de las ciudades que cambian mucho en el tiempo es que son influenciadas por actividades antropogénicas y procesos naturales. Los métodos basados en la idoneidad ignoran las características del paisaje durante la delineación de planes decrecimiento (Santé-Riveira *et al.*, 2008). Este enfoque requiere técnicas eficientes y factibles para establecer los límites. Los AC puede satisfacer múltiples objetivos en la delimitación de la ciudad, incluida la máxima idoneidad urbana y la preservación de tierras agrícolas de alta calidad, zonas de recarga de agua, equipamientos urbanos como calles y parques en la ciudad (Ma *et al.*, 2017; Liang *et al.*, 2018).

En este trabajo utilizamos *python* y *ArcGIS*, como herramienta eficaz para realizar la simulación de AC urbana y delimitar el crecimiento al agregar capas que afectan o limitan el crecimiento de la ciudad lo cual implica varios procedimientos. Primero, recuperamos las variables espaciales y datos de uso de la tierra, elevaciones-uso para estimar la probabilidad de transición de cada tipo de uso de la tierra. En segundo lugar, se realizan las simulaciones entrenando al sistema. Este entrenamiento consiste en introducir escenarios de línea base, desarrollo de zonificación económica y es-

cenarios de crecimiento urbano excesivo. Tercero, realizamos la simulación de la mejor regla encontrada de AC determinista y con ello podemos hacer una comparación del crecimiento con otra imagen de la ciudad en otro instante para encontrar un error inherente a la simulación.

El modelo propuesto en este trabajo puede encontrar restricciones de probabilidad y escenarios múltiples, así como otros factores de restricción. En este trabajo se propone un periodo de simulación que comprende de 2020-2030, en la figura 5 se muestra la ciudad de Toluca generada por el modelo para 2020.

Figura 5. *Ciudad de Toluca para 2020*

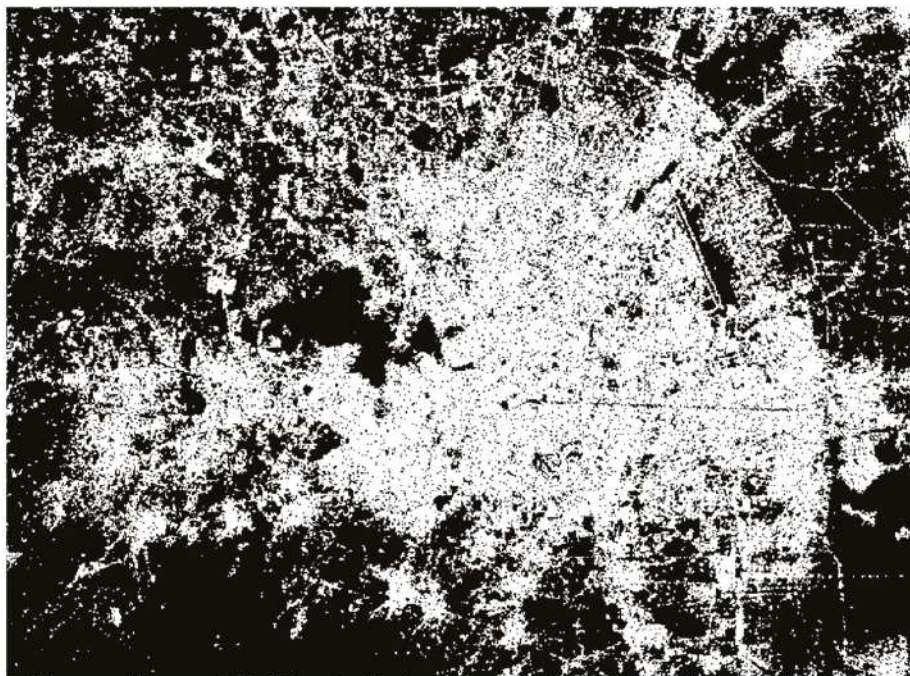


Fuente: elaboración propia.

En la figura 6 se muestra un ejemplo del uso de AC determinista, el área de estudio es la ciudad de Toluca que tiene una característica importante y

muy desarrollada en muchas urbes en el mundo, que está integrada por seis municipios, que es una de las aglomeraciones urbanas de más rápido desarrollo en México proyectadas para 2030. Se utiliza para guiar futuros planes maestros urbanos que pueden evitar el desperdicio de recursos de tierra.

Figura 6. Simulación de AC determinista en el área de estudio de Toluca 2030



Fuente: elaboración propia.

Conclusión

El modelo de AC determinista tiene fortalezas y debilidades. La simulación del rápido desarrollo urbano con modelos de AC se debe principalmente a su sencillez. Sin embargo, la simplicidad del modelo limita la AC que tiene la capacidad de representar fenómenos urbanos realistas, lo que lleva a modificaciones extensas e introducción de complejidad en el modelo. Aparece un cuestionamiento sobre si estos modelos constituyen simulaciones muy

cercanas a la realidad y si son demasiadas las modificaciones a AC que lo constituyen en otro sistema de simulación.

Un punto fuerte de AC determinista es la flexibilidad, que permite su acoplamiento en diferentes aplicaciones. La flexibilidad puede causar confusión y dificultades para los usuarios si no existe una definición estándar de reglas de transición o cuál se aplica. Encontrar el equilibrio entre sencillez y realismo es una característica de los modelos descriptivos, así tenemos un modelo flexible y estandarizado.

El modelo de AC es descriptivo, es decir, que tiene la capacidad para examinar ideas hipotéticas relacionadas con las ciudades. Las imágenes capturadas por satélite, se convierten en nuestros datos de comparación, que pueden variar mucho entre lapsos de minutos, horas, días, por diferentes razones de captura. En este trabajo se propone un método para realizar una buena aproximación de estas imágenes utilizadas por el modelo de AC determinista. Esta aplicación reduce tiempo en el mejoramiento de la imagen obtenida y así no modificar o rediseñar la simulación.

Además, AC determinista está diseñado para operar en *ArcGIS* (un complemento de *software* que se ejecuta en *ArcGIS Desktop*) se ha desarrollado para proporcionar las funciones completas de simulación, predicción, optimización y visualización de una variedad de patrones geográficos y procesos dinámicos, como cambios en el uso de la tierra, evolución urbana, zonificación de áreas naturales para su protección e instalaciones. Como el único *software* que integra la simulación espacial y la capacidad de optimización, AC determinista para *ArcGIS* comprende un simulador y optimizador geográfico, acoplando sus resultados para resolver problemas complejos de simulación y optimización espacial.

El problema que ha surgido en AC determinista es que a los gobiernos o a los planificadores no les interesan estas herramientas de simulación para así tomar mejores decisiones. Muchos usuarios tienen dificultades para obtener detalles de los datos de entrada, especialmente las fechas en las que se obtuvieron. Un ejemplo de esto es el equipamiento urbano que existe en la ciudad, que se construyó después del período simulado y que fue utilizado en la simulación, lo que hace que la simulación sea algo cuestionable.

Se evalúan los resultados de su simulación comparando el mapa simulado con el mapa de referencia de toda el área de estudio, pero no pudo

comparar el porcentaje de errores con el porcentaje de áreas convertidas. Utilizaron métricas erróneas para evaluar el desempeño del modelo, por lo que se proponen nuevas métricas en otros trabajos realizados por este equipo. Unas soluciones pertinentes son separar la información de calibración, desde información de validación a través del espacio (seleccionando píxeles aleatoriamente), en lugar de a través del tiempo (utilizando un mapa urbano de otro año).

Se necesitan más estudios para proporcionar nuevos conocimientos sobre los usos de AC en teorías geográficas y urbanas. La integración de modelos de AC determinista y otros modelos puede superar las debilidades de la AC, como ocurre con los modelos económicos, mejorando así el rendimiento del modelo. Se trabaja en hacer más esfuerzos para mejorar AC mediante la incorporación de interacciones a nivel micro y procesos múltiples. Se propone estudiar las bifurcaciones espaciales, que se refieren al hecho de que, en una pequeña superficie lisa, el cambio en los valores de los parámetros puede causar un cambio repentino en el comportamiento del modelo.

Los modelos de AC determinista no deben usarse para proporcionar predicciones exactas de los sistemas urbanos, pero sí para simular interactivamente diferentes escenarios hipotéticos para la implementación de políticas mediante la modificación de la norma. Una aportación que puede ser destacada es la de incorporar factores del cambio climático en la inteligencia territorial y la planificación urbana, como los efectos de las islas de calor, cambios en la producción agrícola, cambios hidrológicos y cambios en los patrones de uso de la tierra. Esta integración puede facilitar la simulación de cambios futuros en las coberturas terrestres globales y regionales. La simulación de la evolución urbana con categorías de suelo urbano más finas deber a ser atractivas para la práctica de planificación real con la incorporación de *big data* o datos de redes sociales.

Para concluir, las diferentes metodologías se han categorizado según su aplicación entre los diversos estudios, por tanto, para trabajos futuros se destacan y desarrollan los AC con información espacial a nivel local y a escala regional, siendo complicado deslindar el proceso de crecimiento de otros posibles factores que operan con influencias de escalas menores, para lo que se necesitaría idealmente contar con información para todo el periodo de análisis o en su defecto, a través de la generación de escenarios

adecuados que formen parte de otros muchos trabajos, posiblemente como resultado del largo y costoso proceso de recopilación de la información para los múltiples factores que inciden en el crecimiento.

Referencias

- Aburas, M; Ho, Y; Ramli, M; Asháari, Z. (2016). The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 380-389.
- Barredo, J; Kasanko, M; McCormick, N; Lavalle, C. (2003). Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and urban planning*, 64(3), 145-160. <https://goo.su/7kRT36>
- Batty, M. (1998). Urban evolution on the desktop: simulation with the use of extended cellular automata. *Environment and planning A*, 30(11), 1943-1967. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1068/a301943>
- Burak, G; Zhou, Y; Üрге-Voorsatz, U; Gupta, M; Yu, S; Patel, P; Fragkias, M; Li, X; Seto, K. (2017). Global scenarios of urban density and its impacts on building energy use through 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(34), 8945-8950. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1606035114>
- Chettry, V; Surawar, M. (2021). Delineating urban growth boundary using remote sensing, ANN-MLP and CA model: a case study of Thiruvananthapuram urban agglomeration, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(10), 2437-2450. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12524-021-01401-x>
- Feng, Y; Tong, X. (2020). A new cellular automata framework of urban growth modeling by incorporating statistical and heuristic methods. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(1), 74-97. <https://onx.la/f349a>
- Garrocho, C; Jiménez-López, E; Chávez-Soto, T. (2020). Expansión de la ciudad: un instrumento de simulación de escenarios para los sectores público y privado. *La situación demográfica de México 2020*, 2(2).
- Garrocho, C; Chávez-Soto, T; Jiménez-López, E. (2021). Autómata Celular Metro-NASZ: laboratorio experimental de expansión urbana. *CONAPO, La situación demográfica de México*, 149-175.
- Gounaridis, D; Chorianopoulos, I; Symeonakis, E; Koukoulas, S. (2019). A Random Forest-Cellular Automata modelling approach to explore future land use cover change in Attica (Greece), under different socio-economic realities and scales. *Science of the Total Environment*, 464, 320--335. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718328006>
- Jiménez-López, E; Chávez-Soto, T; Garrocho, C. (2018). Modelando la expansión urbana con autómatas celulares: aplicación de la Estación de Inteligencia Territorial (Christaller). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica, Geosig*, 12, 1-26. <https://onx.la/97efe>

- Jiménez-López, E. (2022, June). Inverse Filter in the Growth of Urban Sprawl with Cellular Automata Model. In *Complex Systems and Their Applications: Second International Conference (EDIESCA 2021)* (pp. 231-247). Cham: Springer International Publishing. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-02472-6_12
- Jiménez-López, E; López-Rivera, L. (2023). Artificial neural networks in the application of the growth of the urban sprawl. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(21), 109-119. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/10565>
- Jiménez-López, E. y Cadena Vargas, E. (2024). Probabilidad de Crecimiento de la Mancha Urbana de Toluca con Autómatas Celulares. *CIENCIA ergo-sum*, 32.
- Li, X; Chen, Y; Liu, X; Xu, X; Chen, G. (2017). Experiences and issues of using cellular automata for assisting urban and regional planning in China. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(8), 1606-1629.
- Liang, X; Liu, X; Li, X; Chen, Y; Tian, H; Yao, Y. (2018). Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method. *Landscape and urban planning*, 177, 47-63.
- Liu, Y; Batty, M; Wang, S; Corcoran, J. (2021). Modelling urban change with cellular automata: Contemporary issues and future research directions. *Progress in Human Geography*, 45(1), 3-24.
- Ma, S; Li, X; Cai, Y. (2017). Delimiting the urban growth boundaries with a modified ant colony optimization model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 62, 146-155.
- McGarigal, K; Plunkett, E; Willey, L; Compton, B; DeLuca, W; Grand, J. (2018). Modeling non-stationary urban growth: The SPRAWL model and the ecological impacts of development. *Landscape and urban planning*, 177, 178-190.
- Musa, S; Hashim, M; Reba, M. (2017). A review of geospatial-based urban growth models and modelling initiatives. *Geocarto International*, 32(8), 813-833. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106049.2016.1213891>
- Padilla, O; Pérez, P; Cruz, M; Huilcamaigua, S; Astudillo, S. (2015). Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. *Ciencias Espaciales*, 8(1), 310-326.
- Santé-Riveira, I; Crecente-Maseda, R; Miranda-Barrós, D. (2008). GIS-based planning support system for rural land-use allocation. *Computers and electronics in agriculture*, 63(2), 257-273.
- Torrens, P; O'Sullivan, D. (2001). Cellular automata and urban simulation: where do we go from here?. *Environment and planning B: planning and design*, 28(2), 163-168.
- Valdez, R. (2019). Spatial diffusion of economic growth and externalities in Mexico. *Investigaciones Regionales-Journal of Regional Research*, (45), 139-160.
- White, R; Engelen, G; Uljee, I. (2015). Modeling cities and regions as complex systems: From theory to planning applications. MIT Press.
- White, R; Uljee, I; Engelen, G. (2012). Integrated modelling of population, employment and land-use change with a multiple activity-based variable grid cellular automaton. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(7), 1251-1280.

- Xia, C; Wang, H; Zhang, A; Zhang, W. (2018). A high-performance cellular automata model for urban simulation based on vectorization and parallel computing technology. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(2), 399-424.
- Xia, C; Zhang, A; Wang, H; Liu, J. (2020). Delineating early warning zones in rapidly growing metropolitan areas by integrating a multiscale urban growth model with biogeography-based optimization. *Land Use Policy*, 90, 104332.
- Yin, H; Kong, F; Yang, X; James, P; Dronova, I. (2018). Exploring zoning scenario impacts upon urban growth simulations using a dynamic spatial model. *Cities*, 81, 214-229.

4. Análisis espacial y relaciones socioambientales: un enfoque cuantitativo en la geografía aplicada

AYESA MARTÍNEZ SERRANO*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.279.04>

Resumen

La geografía, como ciencia, ha evolucionado a través de diversas corrientes de pensamiento influenciadas por contextos históricos y filosóficos. La geografía cuantitativa busca describir y explicar la relación entre el entorno físico y social, utilizando métodos estadísticos y herramientas tecnológicas como las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG). Este enfoque cuantitativo ha sido potenciado por la geografía automatizada, que emplea cibernética e informática para mejorar la comprensión del espacio geográfico. La investigación presente enfocada desde la geografía aplicada enfatiza la importancia de entender las interrelaciones entre la población y el ambiente, adoptando un enfoque holístico que considera la dimensión socio-cultural, natural y del patrimonio construido. El análisis socioambiental se enfoca en las complejas relaciones entre sociedad y entorno, con especial atención a la dimensión territorial. Este análisis se basa en un proceso metodológico que incluye la compilación de datos, la aplicación de técnicas de análisis espacial y la diferenciación de áreas geográficas a partir de un conjunto de variables e indicadores. La metodología propuesta, basada en el Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (ESDA), permite identificar patrones espaciales y estructuras heterogéneas, facilitando la toma de decisiones

* Doctora en Ciencias Geográficas. Profesora de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, unidad Mérida de la Universidad Nacional Autónoma de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6987-6815>; Scopus: 2-s2.0-85128827728; correo: ayesa.martinez@enesmerida.unam.mx

informadas sobre la gestión territorial y el desarrollo sostenible. Al final, se obtiene un modelo de diferenciación espacial socioambiental, esencial para abordar los desafíos territoriales en áreas metropolitanas.

Palabras claves: *geografía cuantitativa, análisis espacial, relaciones socioambientales, geotecnologías.*

Introducción

En el contexto actual de la geografía aplicada, existen diversos estudios en búsqueda de soluciones ante las problemáticas ambientales en entornos urbanizados. “La geografía, como campo de generación de conocimiento científico, asume un proceso de transformación que se orienta en tiempos recientes hacia el uso generalizado de la geotecnología, donde el tratamiento y análisis de la información se presentan desde una perspectiva alternativa” (Oropeza y Díaz, 2007: 72). El estudio de los espacios de apropiación urbana, desde la perspectiva del análisis espacial nos brinda una visión diferente del paisaje y de la realidad social.

Desde la geografía, existen diversas contribuciones a los estudios socioambientales que van desde la descripción al análisis e interpretaciones teóricas, hasta el empleo de modelos matemáticos y estadísticos, que en la actualidad se enriquecen con el desarrollo tecnológico (Bocco y Urquijo, 2013). Entre las diferentes herramientas de las tecnologías de la información geográfica, encontramos los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE) mediante el Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (ESDA) sustentadas en las bases del análisis espacial, éstas brindan un amplio marco metodológico para la clasificación del espacio geográfico, porque permiten realizar análisis cruzados de diversas variables con facilidad, relacionar considerables volúmenes de datos y referirlos a determinadas unidades territoriales o espaciales (Humacata, 2014).

El análisis espacial por su contexto integrador, responde a las necesidades del entorno territorial y regional, de acuerdo con Madrigal *et al.* (2009): 141 “en los últimos diez años se ha originado un explosivo desarrollo de las demandas de información geográfica y de las diversas geotec-

nologías, que procesan de forma automatizada esa misma información, con la finalidad de resolver problemas ambientales y socioeconómicos, y son capaces de mejorar la eficiencia en el desempeño de empresas privadas y generar aplicaciones que implican el análisis territorial”. Por su parte, las geotecnologías desde el análisis espacial aportan un componente importante a las herramientas denominadas Sistemas de Apoyo a la Planeación (SAP) en especial por sus capacidades de modelamiento, visualización y comunicación impulsadas por los avances en Tecnologías de la Información Geográfica.

En este trabajo pretendemos realizar un recorrido de una propuesta metodológica para la clasificación multivariable que permita la diferenciación espacial de áreas homogéneas en espacios urbanizados y en procesos de urbanización. Se propone la exploración de la estructura social-urbana de zonas metropolitanas, en una aproximación que tiende a verificar el comportamiento de variables individuales y de conjunto, a partir de la inclusión de la dimensión espacial en la interacción entre bases de datos alfanuméricas y cartografía digital.

Esta propuesta se fundamenta en métodos cuantitativos, se apoya en los postulados de la geografía cuantitativa, la geografía automatizada y la geoeología del paisaje a partir de la concepción de la geometría como lenguaje espacial y de la representación gráfica a través de la matriz de datos geográfica, como un sistema organizador de datos geoespaciales, con el fin de estudiar las distribuciones y asociaciones de problemáticas socio-espaciales en la complejidad del contexto territorial, considerando la unidad geoeológica del paisaje como la base espacial del análisis. Con ello, se logra una diferenciación como modelo territorial que evidencie las heterogeneidades espaciales, con fines de planificación.

Se emplea como caso de estudio la zona metropolitana de Morelia, en el estado de Michoacán de Ocampo en México, por ser un área interesante desde la perspectiva de las complejidades territoriales en la interacción de contextos urbanos, periurbanos y rurales.

Los resultados de esta propuesta metodológica para la diferenciación del espacio al interior de zonas metropolitanas constituyen un importante apoyo a las actividades de planificación y gestión, convirtiéndose en una herramienta aplicable para la toma de decisiones en el ordenamiento

territorial, facilitando la atención a la disposición espacial de las problemáticas socioambientales.

Aspectos conceptuales y metodológicos

La Geografía, como ciencia general desde su largo proceso evolutivo, ha desarrollado una amplia diversidad de líneas de pensamiento que han sido influenciadas por condiciones histórico-culturales específicas y responden a visiones ideológico-filosóficas particulares. Cada una de las corrientes visualiza lo ambiental desde una perspectiva interna, prioriza determinadas bases comunes de la geografía y a la vez genera sus propias categorías (Bocco y Urquijo, 2013).

Aproximaciones teóricas de la geografía cuantitativa y su relación con la perspectiva socioambiental

La geografía cuantitativa surge a mediados del siglo xx como una respuesta al empirismo descriptivo predominante en la disciplina hasta ese momento. Su desarrollo estuvo fuertemente influenciado por el positivismo lógico y la formalización de modelos matemáticos y estadísticos para la comprensión de fenómenos espaciales. A través del uso de métodos cuantitativos, se buscó generar explicaciones más rigurosas y predictivas sobre la organización del espacio geográfico.

Entre los principales referentes teóricos de la geografía cuantitativa se encuentran autores como Peter Haggett (1965), William Bunge (1962) y David Harvey (1969), quienes promovieron el uso de modelos matemáticos y estadísticos para analizar patrones espaciales. Asimismo, la incorporación de teorías de la economía espacial, como las propuestas por Walter Christaller (1933) y August Lösch (1940) dotaron a la geografía de herramientas analíticas para estudiar la distribución y organización del territorio.

Desde una perspectiva socioambiental, la geografía cuantitativa ha permitido evaluar la distribución y el impacto de fenómenos ambientales, como la contaminación, el uso de suelo y el cambio climático. Modelos de telede-

tección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) han fortalecido su aplicabilidad en el análisis de riesgos naturales y en la planificación territorial sustentable.

Geografía cuantitativa y su impacto en la resolución de problemas territoriales contemporáneos

La geografía cuantitativa emergió durante la llamada “revolución cuantitativa” en las décadas de 1950 y 1960, cuando los geógrafos comenzaron a adoptar enfoques estadísticos para explicar la distribución y las relaciones espaciales de diversos fenómenos. Con el tiempo, esta corriente fue criticada por su supuesta falta de consideración de los aspectos sociales y humanos, lo que llevó a la aparición de enfoques más integradores, como la geografía humanista y la geografía crítica.

No obstante, en la actualidad, la geografía cuantitativa ha evolucionado para incorporar dimensiones socioambientales en su análisis. Herramientas como la modelación espacial y el *big data* permiten abordar problemas territoriales contemporáneos, como la distribución de servicios urbanos, la movilidad sustentable y la gestión de desastres naturales. Trabajos recientes, como los de Goodchild (2010) sobre SIG y ciencia de la información geográfica, han ampliado el alcance de la geografía cuantitativa en la toma de decisiones para el desarrollo sostenible.

En conclusión, la geografía cuantitativa, lejos de ser un enfoque limitado a modelos matemáticos abstractos, ha demostrado su relevancia para comprender la complejidad del territorio y contribuir a soluciones pragmáticas ante los retos socioambientales actuales.

Por su parte, la Geografía Cuantitativa trata de describir y explicar las relaciones que existen entre el medio físico y el social, explica los procesos y la dinámica del espacio geográfico y para ello utiliza métodos estadísticos y herramientas de cómputo, que facilitan el uso de grandes bases de datos, modelos matemáticos y otras importantes herramientas como las Tecnologías de la Información Geográfica. De esta manera, el enfoque que se aplica busca mostrar la diferenciación espacial de las problemáticas sociales o de otra índole, determinar el alcance de éstas y caracterizar las necesidades locales

de manera aproximada en cualquier espacio geográfico o contexto territorial (Buzai y García de León, 2015). Conforme a lo anterior, el enfoque cuantitativo apoya el pensamiento geográfico en el marco de una ciencia aplicada, que actualmente se complementa a través del uso de las geotecnologías, que han quedado integradas a partir de la geografía automatizada. Los procedimientos y herramientas desde este enfoque automatizado fortalecen la perspectiva espacial de los estudios sociales y utiliza como medios principales la cibernética y la informática para tener una nueva visión del espacio geográfico.

Las perspectivas de análisis desde la geografía se enfocan en la estrecha vinculación con la noción de ambiente y su dimensión territorial. Resulta conveniente tener en cuenta la relación geografía y ambiente, establecer los postulados teóricos y funcionales, para remarcar sus intereses y fronteras conceptuales frente a otras disciplinas y con ello posibilitar la interacción y el acercamiento con otros campos enfocados en las problemáticas ambientales (Bocco y Urquijo, 2013). La concepción ambiental fue configurándose como una problemática en la que predominaba la integración entre los elementos Naturaleza y Sociedad, por lo que las principales características del paradigma ambiental muestran que el mismo es holístico, sistémico, integrativo y complejo.

En resumen, el siguiente trabajo se fundamenta en el análisis espacial desde el abordaje geográfico aplicado, bajo los supuestos de focalización espacial, a través de la definición corológica y sistémica, para la búsqueda de resultados que nos permitan aprender el contexto territorial de un paisaje transformado y sea de utilidad para la toma de decisiones (Santarelli y Campos, 2002; Delgado Mahecha, 2003; Buzai y Baxendale, 2006, Humacata, 2014).

El análisis espacial desde lo socioambiental

Siguiendo el paradigma ambiental, el análisis de las interrelaciones entre la población y el ambiente requiere de la consideración explícita de un conjunto de criterios conceptuales, que posibiliten mayor precisión y aproximación a la realidad. Lo anterior implica que el potencial de desarrollo sustentable de un determinado espacio, es el resultado de una compleja y dinámica relación entre las tres principales dimensiones que interactúan en el mismo;

la dimensión socio-cultural que incluye a la población y su organización como sociedad, la dimensión natural que se refiere a las características de los componentes naturales y su interacción en el espacio y las condiciones de los recursos naturales y la dimensión del patrimonio construido que incluye la infraestructura física y tecnológica (Guttman *et al.*, 2004).

No obstante, la sociedad se relaciona con su entorno de múltiples formas culturales, sociales, políticas, económicas y ambientales, este último término “ambiente” puede ser interpretado de diferentes maneras, en este trabajo retomamos la concepción del ambiente como el medio biofísico y natural apropiado y transformado por la acción humana. Bajo este contexto, el término socioambiental considerado en esta investigación está definido por la correlación entre las variables sociales y el espacio transformado en que se ubican. “El desarrollo social urbano, por su esencia multifacética y su concreción territorial, posee una estructura típica multivariada, ya que no puede medirse por una única variable, sino que lo caracterizan, por definición, un conjunto de variables e indicadores de diferente índole, que pueden ser sintetizados” (Perón *et al.*, 2018: 181).

Limitaciones del enfoque cuantitativo

A pesar de sus numerosas ventajas, la geografía cuantitativa presenta ciertas limitaciones que pueden afectar los resultados alcanzados. Una de las principales críticas radica en su dependencia de datos numéricos, los cuales pueden estar sujetos a errores de recolección, escalas inadecuadas o una simplificación excesiva de fenómenos complejos (Goodchild, 2010). Esto puede llevar a interpretaciones sesgadas si no se consideran adecuadamente las limitaciones metodológicas y las incertidumbres inherentes a los modelos utilizados.

Asimismo, la estandarización de variables y el uso de modelos matemáticos pueden reducir la complejidad de los fenómenos socioespaciales, obviando factores cualitativos que pueden ser esenciales para una comprensión integral del territorio (Harvey, 1969). La sobredependencia en herramientas computacionales y geotecnologías, como los SIG, puede generar una falsa sensación de precisión, sin considerar que los resultados están condicionados por la calidad y representatividad de los datos ingresados (Goodchild, 2010).

Otro desafío significativo es la objetividad en la selección y ponderación de variables, ya que estas decisiones pueden estar influenciadas por el marco teórico adoptado, lo que introduce sesgos en la interpretación de los resultados (Haggett, 1965). Además, el enfoque cuantitativo tiende a privilegiar patrones espaciales y correlaciones estadísticas, dejando de lado las dimensiones subjetivas y contextuales de la realidad geográfica (Harvey, 1969).

Propuesta metodológica

Los procedimientos metodológicos que se presentan responden a los objetivos planteados y se requiere de tres procesos principales: compilación, análisis y diferenciación. El proceso de compilación comprende la definición de unidades espaciales para el análisis, la selección de indicadores a evaluar y el tratamiento matricial de los datos. El procedimiento de análisis está conformado por la aplicación de técnicas de clasificación univariada, bivariada y multivariada al conjunto de índices e indicadores seleccionados mediante el Análisis exploratorio de Datos Espaciales (ESDA), que en palabras de Anselin, 1999, (citado por Chasco Yrigoyen, 2003), puede definirse como el conjunto de técnicas que describen y visualizan las distribuciones espaciales, identifican localizaciones atípicas o “atípicos espaciales” (spatial outliers), resaltan esquemas de asociación espacial, agrupamientos (clusters) o sitios “calientes” (hot spots) y sugieren estructuras espaciales u otras formas de heterogeneidad espacial. Por último, se obtiene el modelo de diferenciación espacial socioambiental de la zona metropolitana a través de la ponderación de los criterios seleccionados y el análisis jerárquico.

Compilación

Definición de unidades espaciales para el análisis

Las unidades espaciales para el análisis se obtuvieron de un trabajo de investigación precedente denominado unidades geoecológicas, que hacen

referencia a las áreas donde coinciden una misma unidad del paisaje físico-geográfico y la combinación de coberturas terrestres y tipos de usos de suelo y por tanto la misma combinación de procesos de degradación y problemáticas ambientales, cuando son obtenidas en un contexto de ciudad pueden ser nombradas como unidades del paisaje urbano o paisaje antropogénico. No obstante, de acuerdo con los enfoques y escala en que se aplique esta metodología, se pueden utilizar unidades administrativas como; Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBs), manzanas, colonias, etc.

Selección de los indicadores

Los indicadores por seleccionar dependen de la escala espacial y temporal que representan y de la disponibilidad de datos. La presente investigación sigue el método de agregación, a través de dos índices de síntesis, que compilan dos grupos de indicadores e índices cuantitativos representativos de la complejidad socioambiental del territorio, que conforman los índices de condiciones socio-habitacionales y de degradación del entorno.

Grupo I. Evaluación de variables socio-habitacionales: este índice permite definir modelos de comportamiento espacial de una ciudad con relación a la situación socio-habitacional, a escala territorial, con la finalidad de enfocar la condición multidimensional y multifactorial que presenta el desarrollo urbano y su dimensión social, considerando variables estratégicas socio-habitacionales. Se intentó cubrir un amplio espectro de variables dentro del marco de la información disponible, relacionadas con aspectos demográficos, de salud, educacionales, de hogares, de calidad de la vivienda y la infraestructura de servicios.

La selección se realiza con la finalidad de que sean indicadores capaces de sintetizar la problemática social referente a la demografía, educación, salud y habitacionales, ya que son dimensiones que muestran de forma multilateral el desarrollo urbano. Para ello se utiliza el criterio de los expertos, a partir de su grado de conocimiento en la temática, la experiencia profesional y nivel de responsabilidad en la elaboración de políticas públicas. En la investigación, como apoyo, se consultaron los planes de desarrollo urbano de los municipios de Morelia y Tarímbaro, variados informes académicos del Centro de Investigación en Geografía Ambiental (CIGA) y se

realizaron pláticas con personal del Ayuntamiento de Morelia y académicos especialistas en estudios urbanos.

Grupo II. Evaluación de la degradación del entorno: este grupo de indicadores e índices tienen el objetivo de evaluar el estado de los componentes biofísicos del paisaje ya urbanizado (paisaje cultural), en función de las implicaciones que tienen éstos para el territorio. Con los índices que se estudian, se busca interpretar los niveles de degradación en los componentes naturales en función de los aspectos o problemas resultantes de la interacción entre el sistema social y las transformaciones en el espacio natural. Las ciudades son el espacio donde se concentra la mayor parte de la población humana y de sus actividades, por ello, en su territorio coexisten numerosos problemas relacionados con el aprovechamiento de los recursos naturales y con la organización y funcionamiento en equilibrio con el entorno.

Obtención de las matrices de datos geográficos

La matriz geográfica se refiere a una tabla de doble entrada que representa valores de una serie de características (columnas) y unidades espaciales (filas). “Ello permite asignar cada hecho geográfico ubicado en una estructura fila-columna, a una porción específica del espacio geográfico con determinada resolución espacial... La denominada matriz geográfica es el resultado de la combinación de vectores fila (j-unidades espaciales) por vectores columnas (i-variables), por tal motivo una diferenciación en las escalas de trabajo estaría brindada por la forma de interpretar esta organización. Surgen a partir de aquí tres perspectivas de análisis: un sentido vertical o regional, uno horizontal o sistemático y otro en profundidad (diferentes matrices superpuestas) o temporal” (Buzai *et al.*, s/f: 5).

Los datos geoespaciales o variables provienen de diversas fuentes de información oficiales que están referidos a diferentes unidades espaciales administrativas, es por ello que se deben obtener las variables con valores absolutos y no los indicadores o variables relativas que refieren la información de acuerdo a estas áreas (porcentajes, tasas). Como parte de la organización de los datos que se obtienen para el cálculo de los indicadores e índices, se conforma la matriz de datos originales (MDO) considerando en las filas las unidades espaciales de análisis (unidades geoecológicas) y el

grupo de variables absolutas seleccionadas en las columnas, para ello se realiza una intersección espacial mediante *Arcgis 10.8*, para transferir los datos de diferentes aspectos y fuentes (sociales, biofísicos y ambientales).

A partir de la MDO se realiza el cálculo de los indicadores e índices, de los que se obtienen los valores relativos a cada unidad espacial de análisis, los resultados del cálculo se organizan en una nueva matriz. Esta matriz es denominada Matriz de Datos Índices (MDI) y mantiene la estructura de las filas, pero ahora en las columnas se representan índices o indicadores.

Posteriormente se realiza un tratamiento estadístico a los datos en la MDI con el objetivo de homogenizar los indicadores, debido a la diversidad de unidades de medidas en que se obtienen los indicadores e índices; ello se realiza mediante el puntaje estándar. El puntaje Z (estándar); es un coeficiente de variación que se utiliza cuando se desea obtener una síntesis en la comparación entre variaciones de indicadores que han sido obtenidos en diferentes unidades de medida. Este método es presentado por Haggett (1977) empleado para las clasificaciones o tipologías espaciales, además de ser utilizado por Buzai en casi toda su obra. Se obtiene aplicando la siguiente ecuación a los valores por columna en la MDI:

$$Z_i = \frac{(X_i - m)}{\sigma}$$

donde:

X_i = es el valor que posee cada unidad espacial

M = es el promedio del indicador

Σ = es la desviación estándar

Cuando el procedimiento se realiza a todos los indicadores, cada columna de la MDI pasa a ser una columna de puntajes Z, que se desvía en valores positivos y negativos, al realizar esto se debe comprobar que los resultados arrojen: $\Sigma=0$, $m = 0$, y $\sigma =1$ por cada indicador. Como resultado de aplicar este proceso de homogenización del valor de los indicadores, estos se hacen comparables y la matriz anterior se transforma en la Matriz de Datos Estandarizados (MDZ).

Por otro lado, es muy importante tener en cuenta la intensidad o sentido que miden los indicadores seleccionados, en función de la definición de los indicadores de beneficio y de costo, con la finalidad de obtener una clasificación de unidades espaciales, mediante indicadores de planificación territorial. Definimos a los indicadores de beneficio como aquellos que en sus máximos valores expresan una situación de máxima favorabilidad o bienestar (por ej. Nivel de Escolaridad Alcanzado); y los indicadores de costo son aquellos que en sus máximos valores expresan una situación de máxima desfavorabilidad o desventaja (por ej. Necesidades Básicas Insatisfechas en las viviendas). Para homogenizar los datos bajo este criterio de intensidad o sentido se aplica un procedimiento de reclasificación, el cual permite obtener una nueva capa temática, más simplificada y una capa binaria con valores temáticos de 1 a 5, con mejores posibilidades de interpretación. La clasificación por grado de intensidad parte de la Matriz de Datos Estandarizados, mediante los cuales se procede a la generación de cartografía síntesis que resume las situaciones de favorabilidad/desfavorabilidad para el índice sumario, esto genera una nueva matriz: Matriz de Datos Categorizados (MDC), ver tabla 1.

Tabla 1. Valor por nivel de intensidad para indicadores de beneficio y costo

Categorías	Nivel de Intensidad	
	Indicadores de beneficio	Indicadores de costo
Clasificación _SIG		
Muy alta	1	5
Alta	2	4
Media	3	3
Baja	4	2
Muy baja	5	1

Fuente: elaboración propia.

Método para el Proceso de Análisis Jerárquico. Árbol de decisiones

“El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), consiste en formalizar la comprensión intuitiva de un problema multicriterio complejo, mediante la construcción de un modelo jerárquico. Es una metodología para estructurar, medir y sintetizar. Ha sido aplicado ampliamente en la solución de una gran

variedad de problemas que permite estructurar el problema en forma visual"... El AHP utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones, y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos de un nivel, con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior" (Osorio y Orejuela, 2008: 248). El modelo jerárquico contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas (Toskano, 2005), y tiene tres funciones básicas: estructurar la complejidad, medir en una escala y sintetizar.

El AHP es un método de síntesis con un enfoque sistémico, ya que analiza las decisiones a partir de la descomposición jerárquica, "tomando en consideración el objetivo general y las interdependencias existentes entre los conjuntos de factores, criterios y alternativas, por lo tanto, este método está enfocado en el sistema en general, y la solución que presenta es para la totalidad, no para la particularidad" (Osorio y Orejuela, 2008).

El principio del proceso de Saaty se fundamenta en dar valores numéricos a los juicios dados por las personas involucradas, logra medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende (Ávila, 2000), ver cuadro 2. El AHP dispone de un *software* de apoyo y su aplicación comprende una diversa gama de experiencias prácticas en campos muy diversos, el *software Expert Choice* es uno de los más utilizados para la aplicación del AHP (Toskano, 2005).

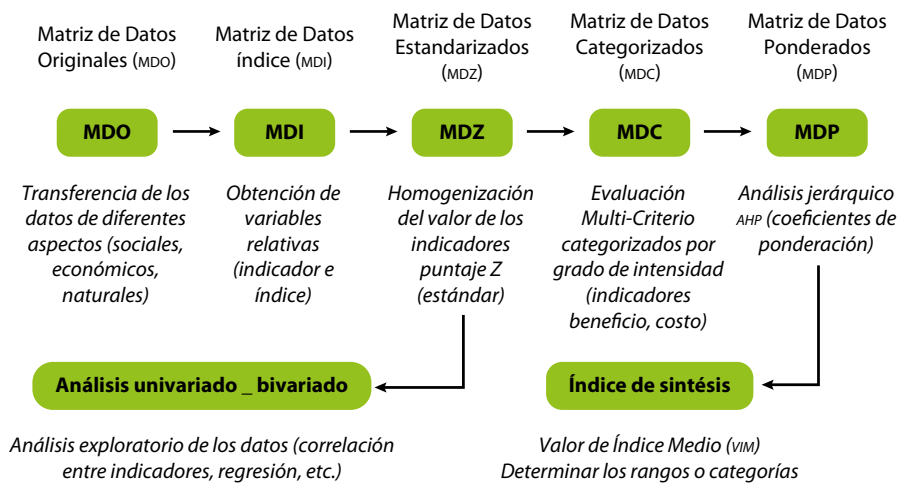
Tabla 2. Escala de preferencias de Saaty adaptada

<i>Planteamiento verbal de la preferencia</i>	<i>Interpretación</i>	<i>Calificación numérica</i>
De igual importancia	2 aspectos contribuyen de igual forma al objetivo	1
Moderada importancia	La experiencia y el conocimiento favorecen levemente a una actividad sobre la otra	3
Fuertemente importante	La experiencia y el conocimiento favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra	5
Esencialmente importante	Una actividad es mucho más favorecida que la otra y su predominio se demuestra en la práctica	7
Extremadamente importante	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta y totalmente clara	9
Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes	2, 4, 6, 8

Fuente: elaborado por el autor adaptado de Toskano, 2005.

Una vez elaboradas las comparaciones pareadas, se calcula la prioridad que adquiere cada elemento (indicador) en términos de la meta global, que en este caso es la ponderación de los indicadores. Este proceso se conoce como la síntesis de los juicios, obteniendo como resultado la prioridad de cada atributo o indicador expresado en porcentaje, es decir, se obtiene la importancia o peso que adquieren los indicadores considerados en el análisis de cada grupo de indicadores. Posteriormente, se le asigna el coeficiente de ponderación a los valores de cada indicador correspondiente y con ello se genera una nueva matriz denominada Matriz de Datos Ponderados (ver figura 1).

Figura 1. Resumen del orden de las matrices de datos geográficas que se obtienen



Fuente: elaboración propia.

Análisis exploratorio de los datos espaciales

Para realizar el estudio de la estructura espacial socioambiental aplicaremos los métodos gráficos del Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (ESDA), con el apoyo de la Matriz de Datos Índice (MDI).

Clasificación univariada

El análisis espacial univariado permite lograr una clasificación socioambiental a partir del estudio de un sólo tema o variable. De este modo, se llega a la definición de una diferenciación espacial sobre la base de los intervalos de clase definidos para el conjunto de datos. Como sostiene Sánchez (2007: 390) “para poder entender ese sistema habrá que empezar por analizar cada una de sus partes, y cada uno de los muchos y distintos aspectos en que se divide esa totalidad puede expresarse a través de una variable estadística para la cual también merece ser clasificado el espacio geográfico, y por supuesto también expresado cartográficamente”.

“El análisis estadístico univariado permite estudiar tres características que definen a una variable cuantitativa: su valor central o más representativo, su variabilidad en torno a ese valor central y su distribución de frecuencias” (Bosque, 1994:15). Como complemento a este tratamiento numérico de los datos geográficos se destaca la representación gráfica que se convierte en una herramienta para analizar de una forma rápida y eficaz la evolución, magnitud y distribución de un hecho (Carrera y Méndez, 1998:39).

Para el análisis exploratorio univariado, se aplica el gráfico box-plot que toma a la mediana como valor central y de ahí se definen los intervalos de clase en los que se dividirán el conjunto de unidades espaciales. En este caso, las unidades espaciales fueron agrupadas en cuatro intervalos de clase dando como resultado un mapa de cuartil (box-map), en el cual se resaltan los valores extremos tanto superior como inferior, generando dos categorías adicionales. Este gráfico y su derivación en el box-map, nos permitirán visualizar los valores anómalos en cada indicador.

Clasificación bivariada o análisis de correlación de indicadores

La clasificación bivariada del espacio geográfico surge a partir de la delimitación de áreas homogéneas que reúnen características similares internamente y que se diferencian del resto de las unidades espaciales. Considerar estas relaciones se debe a la intención de determinar la manera en que los valores medidos en las diferentes unidades espaciales varían conjuntamente.

te o, si se determina una situación de causa-efecto, de qué forma varía una cuando se modifica la otra; en general se trata de medir el grado de relación y la forma que toman, acercándose a uno u otro extremo. Cuando nos aproximamos a determinar la relación entre dos variables se hace notar que está caracterizada por tres elementos: la fuerza, el sentido y la forma de la relación (Bosque y Moreno, 1994), ello nos permite considerar el grado de relación entre los valores medidos en las distintas unidades espaciales.

Más allá de la descripción de las distribuciones espaciales, cuya fase es fundamental en el análisis, se debe conocer la relación entre las variables en el análisis socioespacial urbano, determinar la existencia y las características de la relación entre dos variables. En el análisis de asociación espacial, mediante gráficos de dispersión 2D (*scatterdiagram*), cada variable queda representada por un eje ortogonal (90°) y cada unidad espacial como un punto de localización x-y, a partir de sus valores de coordenadas en cada eje (Buzai y Baxendale, 2006). “Los valores de las variables en el diagrama fueron transformados a puntajes estándar (puntaje z), dando como resultado la definición de cuatro cuadrantes en el espacio de relaciones. De este modo, el cuadrante inferior izquierdo representa las unidades espaciales con valores bajos en ambas variables, el cuadrante superior izquierdo con bajos valores en x y altos en y, el cuadrante superior derecho con valores altos en ambas variables, y el cuadrante inferior derecho con valores altos en x y bajos en y. Cuando analizamos el sentido de la relación entre ambas variables se calcula la recta de regresión tomando la nube de puntos formada por todas las unidades espaciales en el sistema de coordenadas. Si la recta va desde el espacio (- -) al espacio (+ +) se dice que existe una relación positiva y cuando se dirige desde el espacio (- +) al espacio (+ -) la relación es negativa. Cuando la nube de puntos adquiere una forma redondeada, donde se hace imposible determinar un sentido, no existe correlación” (Humacata, 2015: 76).

Este método permite verificar a través de la creación del diagrama de dispersión la existencia de una efectiva relación entre dos variables y la dirección que tiene esta relación (negativa o positiva), en este caso la intensidad sólo puede intuirse; cuanto más cercano estén los puntos a la recta de regresión, mayor será la intensidad de la relación entre las dos variables y cuanto más dispersos estén, menor será su relación. Para lograr un valor cuantitativo que indique la intensidad de la relación se utiliza el coeficiente de corre-

lación de Pearson (r) que surge de la covarianza o variabilidad conjunta de las variables. Se puede obtener una correlación perfecta positiva ($r=1$), cuando los valores de una variable varían en la misma proporción que los valores de la otra, o una correlación perfecta negativa ($r=-1$), cuando los valores de cada variable varían completamente de forma inversa. Cuando se produce una distribución aleatoria, el coeficiente de correlación toma un valor $r=0$.

Siguiendo los objetivos planteados, en la presente aplicación vamos a realizar un análisis univariado mediante el gráfico y mapa de caja (box-map) resaltando los valores anómalos de los indicadores que presentan situaciones diferenciadas; y un análisis bivariado por diagrama de dispersión (*scatterdiagram*) con base en el coeficiente de correlación de Pearson, que nos permitirá agrupar las unidades espaciales con respecto a sus cuadrantes en el espacio de relaciones en una perspectiva 2D, para ello hemos tomado indicadores que determinan las relaciones entre situaciones de favorabilidad y desfavorabilidad, que nos permite realizar las primeras clasificaciones parciales.

Clasificación multivariada

“La clasificación multivariada del espacio geográfico genera como resultado una diferenciación areal en torno a la combinación de una gran cantidad de variables, las cuáles se consideran relevantes para llegar a la definición de unidades espaciales diferenciadas claramente mediante su configuración espacial, producto de la alta homogeneidad interna relativa y, por el contrario, de la heterogeneidad con respecto a las demás unidades espaciales o áreas geográficas” ...El análisis multivariado con el objetivo de clasificar un espacio puede aplicarse en dos direcciones: la primera, enfocada en la clasificación de los indicadores, para lograr macrovariables que integren los componentes de la problemática y la segunda, centrada en la correlación de unidades espaciales, para obtener áreas o regiones geográficas (Buzai y Baxendale, 2006; Sánchez, 2007). El resultado final de la clasificación multivariada es la construcción de áreas homogéneas como modelo espacial, que evidencia las heterogeneidades espaciales internas del área de estudio, siendo una representación simplificada de la realidad que expresa sus características más significativas” (Humacata, 2015: 77). Entre los métodos de análisis multivariado más comunes,

podemos mencionar el método del Valor Índice Medio (VIM), el Análisis Linkage, Análisis Clúster y el Análisis Factorial. Para la presente investigación aplicaremos el método del Valor del Índice Medio que forma parte de los métodos de clasificación alternativos, se le nombra “Metodología del Valor del Índice Medio”, porque se define por la obtención de un índice capaz de reflejar las condiciones generales de cada una de las macrovariables evaluadas.

Para ello, se utilizan los resultados del cálculo de los dos índices de síntesis tratados como macrovariables. Se debe tener en cuenta que esta metodología alcanza su mejor aplicación cuando está enfocada a determinar los casos, dentro de un conjunto de unidades territoriales, que tienen mayor semejanza entre sí como para conformar subconjuntos particulares, derivando tal semejanza a partir de la similaridad (homogeneidad) que existe entre el valor de las variables de esas unidades territoriales, de esa manera se evalúan las macrovariables de conjunto mediante un tratamiento matemático de relativa complejidad (García de León, 1997). Los dos índices de síntesis, como hemos explicado, son:

- referido al espacio relacional donde transcurre el desarrollo urbano; el índice de condiciones socio-habitacionales, que relaciona al hombre y sus necesidades de crecimiento, con indicadores demográficos, sociales, económicos y habitacionales.
- relacionado con el hombre y su capacidad de transformar el espacio geográfico; el índice de degradación del paisaje transformado, con indicadores de las problemáticas ambientales.

Cada una de estas macrovariables agrupan una serie de índices e indicadores que representan en su contexto diferentes problemáticas del territorio, mismas que, cuando se integran en una matriz, demuestran cómo se combinan para obtener de forma simultánea diferentes estados de la situación socioambiental del paisaje urbano al interior de las zonas metropolitanas.

Obtención del mapa de síntesis de la diferenciación socioambiental

Consiste en efectuar el cálculo del Valor de Índice Medio (VIM) para cada unidad geoecológica sumando en el sentido de las filas la totalidad de las

calificaciones (c) obtenidas y dividir el resultado entre la cantidad de variables utilizadas (n), como se muestra a continuación:

$$VIM = \frac{\sum c}{n}$$

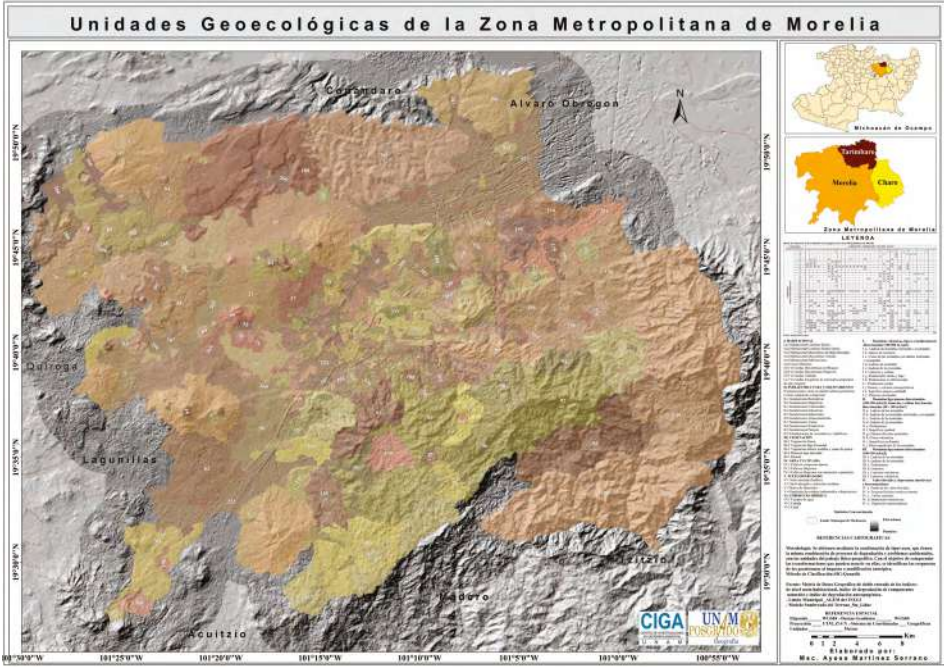
Por último, se clasifican las unidades geoecológicas sobre la base de cinco intervalos para realizar la cartografía síntesis (diferenciación espacial), con cinco categorías; dos rangos de valores superiores a la media del conjunto; uno cercano a la media y dos rangos de valores inferiores a la media del conjunto, este procedimiento se puede llevar a cabo de forma manual o se pueden aplicar los métodos de clasificación del SIG, desviación estándar o cortes naturales. Se recomienda realizar una comparación entre los resultados obtenidos por cada vía y con ello determinar la clasificación de las categorías que más se aproximan a los aspectos analizados.

A partir de la evaluación de la intensidad de los cambios en el sustrato natural y el grado de transformaciones en el paisaje urbano, resultado de la apropiación del espacio en el proceso de urbanización de la zona metropolitana, se describen las categorías de la diferenciación socio-ambiental: situación transformación leve, situación transformación media, situación transformación extensiva, situación muy transformado y situación transformación extrema, las cuales sintetizan la calidad socio-ambiental a través del modelo de los subsistemas físico-natural y económico-social, en las unidades geoecológicas.

Aplicación e interpretación de los resultados en la Zona Metropolitana de Morelia

Como mencionamos anteriormente, en la presente aplicación retomamos las unidades geoecológicas obtenidas en el trabajo (Martínez y Bollo, 2017), debido a que las mismas representan sistemas funcionales de la interacción entre la naturaleza y la sociedad que manifiestan la apropiación histórica del territorio y sus transformaciones; desde esta perspectiva, resulta recomendable emplear estas unidades espaciales, en los análisis de problemáticas sociales, económicas y ambientales (ver figura 2).

Figura 2. Mapa de unidades geológicas de la Zona Metropolitana de Morelia



Fuente: Martínez y Bollo (2017).

Selección de indicadores

Con ello se generan las matrices de datos geográficas, a partir de las cuales se realizan los análisis univariados y bivariados de los indicadores.

Tabla 3. Indicadores e índices seleccionados

Índice de condiciones socio-habitacionales		
Dimensión social	Porcentaje de la población sin derechohabencia a servicios de salud	costo
	Porcentaje de la Población de 15 años y más, analfabeta	costo
	Porcentaje de la Población de 18 años y más, con al menos un grado aprobado en educación media superior	beneficio
	Porcentaje de no asistencia a la escuela de la población en edad escolar normativa básica	costo
	Nivel de escolaridad alcanzado por la población	beneficio

<i>Índice de condiciones socio-habitacionales</i>		
Dimensión demográfica	Porcentaje de población de 0 a 14 años	beneficio
	Porcentaje de población de 15 a 64 años	beneficio
	Porcentaje de la población de 65 años y más	costo
	Atracción migratoria acumulada	costo
	Porcentaje de la población de 5 años y más residente en Estados Unidos de América, en junio 2005	costo
	Tasa de la población inmigrante reciente	costo
	Porcentaje de la población con discapacidad	costo
	Densidad de población	costo
Dimensión económica	Tasa de participación económica	beneficio
	Porcentaje de la población ocupada de 12 años y más, sin escolaridad	costo
	Índice de dependencia económica	costo
	Tasa de actividad económica	beneficio
Dimensión condiciones y servicios de la vivienda	Índice de servicios básicos insatisfechos (viviendas)	costo
<i>Índice de degradación del medio transformado</i>		
Componente vegetación	Índice de importancia de las zonas verdes	beneficio
	Índice de transformación de la cobertura vegetal natural	costo
	Índice de antropización de la cobertura superficial	costo
Componente suelo	Degradación de la permeabilidad del suelo por transformación de la cobertura terrestre	costo
	Degradación del suelo	costo
Componente hidrología	Densidad de drenaje superficial	beneficio
	Condiciones de riesgo hidrológico e hidrotécnico	costo
Componente relieve	Incompatibilidad entre pendiente y urbanización	costo
Componente geología	Riesgo por la presencia de fallas y fracturas	costo
Componente atmósfera	Estimación de la contaminación atmosférica promedio	costo
Dimensión antropogénica	Índice de modificación antropogénica por la presencia de elementos antrópicos en el paisaje	costo
	Calidad del entorno habitacional	beneficio

Fuente: elaboración propia.

Con ello se generan las matrices de datos geográficas, a partir de las cuales se realizan los análisis univariados y bivariados de los indicadores.

Aproximación del análisis univariado

Como se explicó anteriormente, el análisis univariado, mediante el gráfico de caja y su vinculación cartográfica, pretende resaltar los valores anómalos que toma cada indicador en la diferenciación socioambiental de las unidades

geoecológicas de la Zona Metropolitana de Morelia. A continuación, se presentan algunos de los resultados obtenidos como referencia de los análisis cuantitativos y cualitativos que se obtienen luego de aplicar estas técnicas, que se desarrollan en el *software* libre Geoda:

- Tasa de Población Inmigrantes Reciente (TPI-R)

Se observan, 50 (UGS) que representan los valores más extremos, destacados como valores anómalos en color café oscuro, correspondientes a la categoría “muy alto”, es decir situación desfavorable, teniendo en cuenta que es población que se ha trasladado a otros lugares abandonando la entidad de nacimiento. Estas unidades espaciales corresponden a las UGS: 71, 216, etc.; Fraccionamiento la Condesa, Conjunto Habitacional la Hacienda (ver tabla 4).

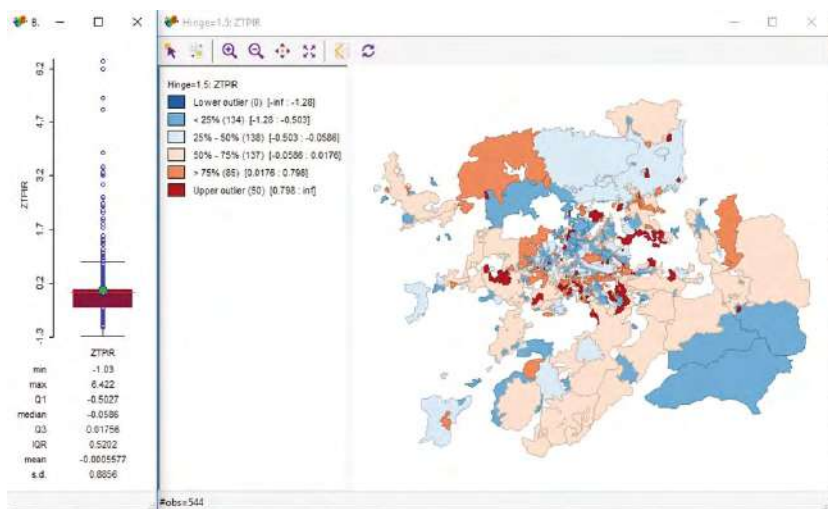
Tabla 4. Resumen por categorías del indicador Tasa de Población Inmigrantes Reciente (TPI-R)

CATEGORÍA	VALOR (estandarizado)	VALOR (porcentajes)	Unidades Geoecológicas (cantidad UGS)
Muy bajo	-0.35852	0.34 – 1.87	72
Bajo	-0.20621	1.88 – 2.76	77
Medio	-0.23667	2.78 – 3.81	79
Alto	-0.33743	3.83 – 5.27	88
Muy alto	0.14643 - 6.42170	5.36 – 32.14	110
Sin datos	0	N/A	

Fuente: elaboración propia.

En el otro extremo perteneciente a la categoría “muy bajo” no tenemos unidades con esta condición, sólo existen varias unidades en la zona rural que no han tenido inmigrantes. En este caso la población inmigrante, se localiza principalmente en la zona periurbana sur del centro de la ciudad de Morelia; además, es alta en grandes fraccionamientos que existen en el margen entre la zona periurbana de los municipios Morelia y Tarímbaro; en este indicador es interesante observar cómo las unidades con valores extremos se encuentran principalmente en la zona periurbana (ver figura 3).

Figura 3. Gráfico y mapa Box Plot de Tasa de Población inmigrantes reciente a partir de software Libre Geoda



Fuente: elaboración propia.

- Porcentaje de la población sin derechohabencia a servicios de salud (SALUD2-R)

Se observan, 23 (UGS) que representan los valores más extremos, destacados como valores anómalos en color café oscuro, correspondientes a la categoría muy alto, es decir situación desfavorable, en el sentido de existir mayor cantidad de personas sin acceso a los servicios de salud en proporción con la población total (ver tabla 5).

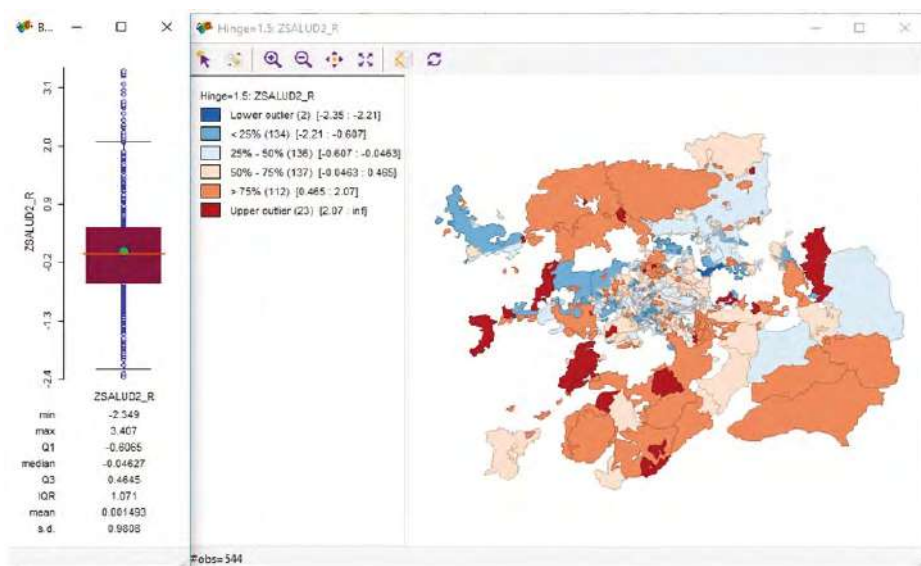
Tabla 5. Resumen por categorías del Porcentaje de la Población sin derechohabencia a servicios de salud (SALUD2-R)

CATEGORÍA	VALOR (estandarizado)	VALOR (porcentajes)	Unidades geoecológicas (cantidad ugs)
Muy bajo	-1.57797	3.26 - 25.58	117
Bajo	-0.58325	25.71 - 33.96	116
Medio	-0.21704	33.99 - 37.06	58
Alto	0.04175 - 0.55218	37.08 - 44.30	116
Muy alto	0.55289 - 3.40694	44.31 - 84.68	116
Sin dato	0	N/A	

Fuente: elaboración propia.

Estas unidades espaciales corresponden a las UGS: 156-4, 149-3, 280, 208-10, 45-2, 55-4, 268-2, 216-1, 59, 141-1, 279, 137-5, 137-6, 5-2; Las Encinillas, Peña Cargada, Jaripeo, Fracc. México, Cuparátaro, Chiquimitío, Parastaco, Joyitas del Cuetazo, Crisoba Industrial (CEPAMISA), Quinta María José, El Aguaje, La Estancia, El Reparo, Tirio, Carindapaz (San Francisco) [Invernadero], La Ciénega (Torrecillas de Atécuaro), Torrecillas, El Arenal Atécuaro, La Laguna (Los Caracoles), El Arenal, Palo Amarillo, El Tejocote (La Cortina), Buenavista, Iratzio. En el otro extremo perteneciente a la categoría muy bajo, se encuentran las unidades: 248-1 y 218-20, Vasco de Quiroga y Ciudad industrial. Este indicador, se localiza con valores extremos principalmente en zonas rurales y en el sector norte del centro urbano de la ciudad de Morelia (ver figura 4).

Figura 4. Gráfico y mapa Box Plot del porcentaje de la población sin derechohabencia a servicios de salud a partir de software Libre Geoda



Fuente: elaboración propia.

Aproximación al análisis bivariado

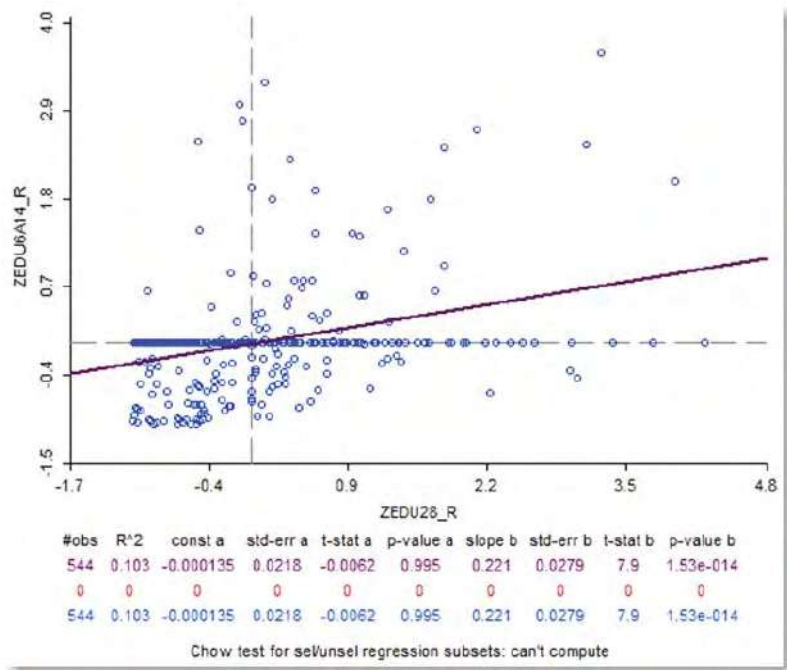
Mediante la flexibilidad que permite la interactividad en la vinculación de bases de datos alfanuméricas (variables) y gráficas (cartografía digital), la metodología del ESDA apoyada a través de los Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE) permite obtener las primeras clasificaciones del espacio geográfico. A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos como referencia de los análisis cuantitativos y cualitativos que se obtienen luego de aplicar estas técnicas, que se desarrollan con apoyo del *software* libre Geoda:

- Porcentaje población de 15 años y más analfabeta_EDU28_R y Porcentaje de la población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela _EDU6a14_R

El gráfico de dispersión realizado para el porcentaje población de 15 años y más analfabeta y porcentaje de la población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela, permite observar que existe una relación positiva entre estos indicadores, ya que la recta va desde el espacio (- -) al espacio (+ +). En este diagrama se puede apreciar que el coeficiente de correlación es de $r = 0.221$. Este resultado indica que la relación existente entre ambas variables es positiva, pero el grado de relación es muy baja ya que se encuentra por debajo de la media de $r = 1$. Esto implica que la población analfabeta todavía no se relaciona directamente con los niños que no asisten a la escuela, aunque éstos pueden convertirse potencialmente en esta población analfabeta en un futuro. La población analfabeta de 15 años y más, varía con respecto a la población de niños que no asisten a la escuela en un 10% (ver figura 5).

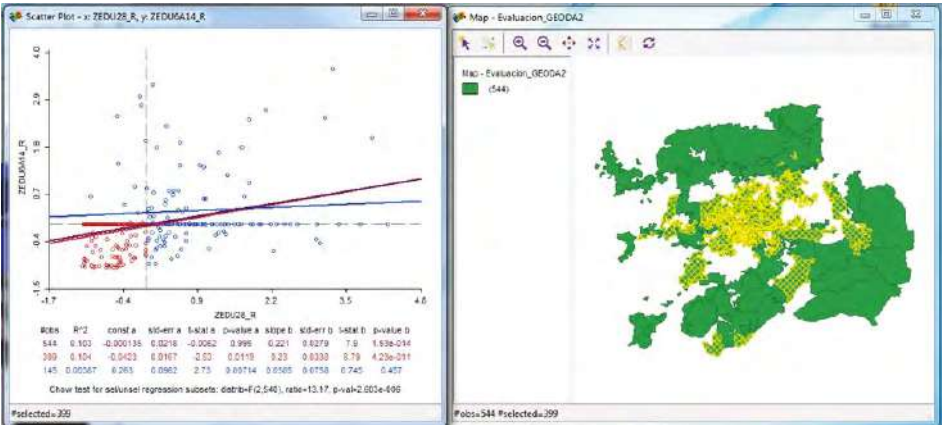
En la selección del cuadrante I, correspondiente al espacio (- -) (inferior izquierdo), se observa la distribución espacial de 399 UGs que poseen muy bajos valores en ambas variables y que representan el 73.35 % de las unidades espaciales con datos (544). Este porcentaje de UGs se distribuye en el espacio geográfico formando un agrupamiento de unidades contiguas; se distinguen el conjunto de unidades al centro del área urbana de la zona metropolitana de Morelia (ver figura 7).

Figura 5. Gráfico de dispersión de EDU28-R y EDU6a14-R a partir de software libre Geoda



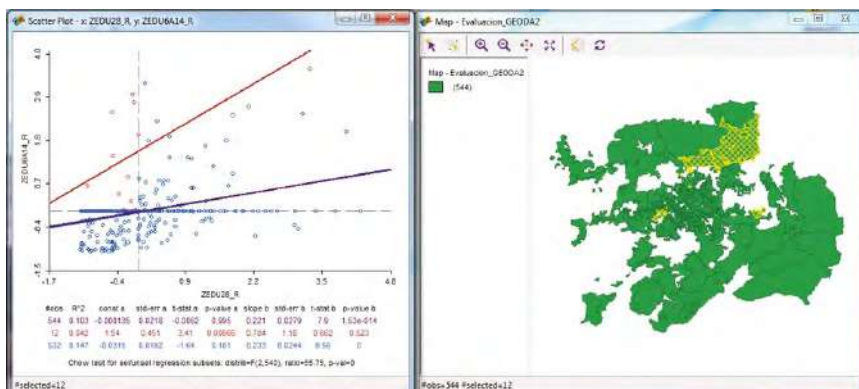
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Gráfico y distribución cuadrante I de EDU28-R y EDU6a14-R a partir de software libre Geoda



Fuente: elaboración propia.

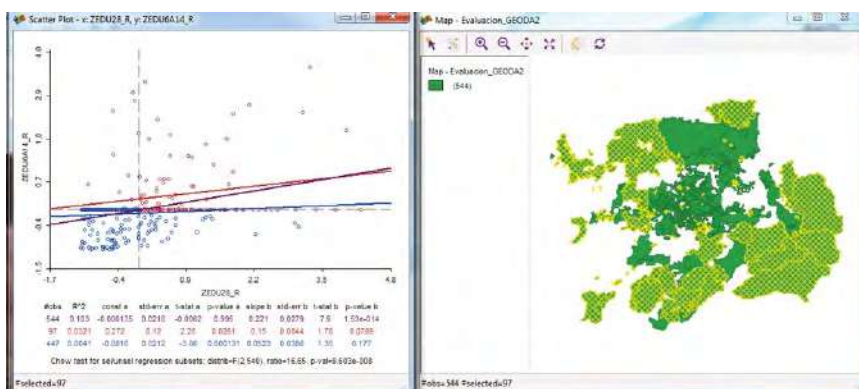
Figura 7. Gráfico y distribución cuadrante II de EDU28-R y EDU6a14-R a partir de software libre Geoda



Fuente: elaboración propia.

En el cuadrante II espacio (- +) (superior izquierdo) se pueden observar aquellas UG que cuentan con valores altos en el indicador del porcentaje de población de 15 años y más, analfabeta y bajos en la población de 6 a 14 años, que no asiste a la escuela. Son 12 unidades que representan el 2.21% de las unidades espaciales. Se observa que predominan estas unidades en el área rural del municipio de Tarímbaro (ver figura 8).

Figura 8. Gráfico y distribución cuadrante III de EDU28-R y EDU6a14-R a partir de software libre Geoda

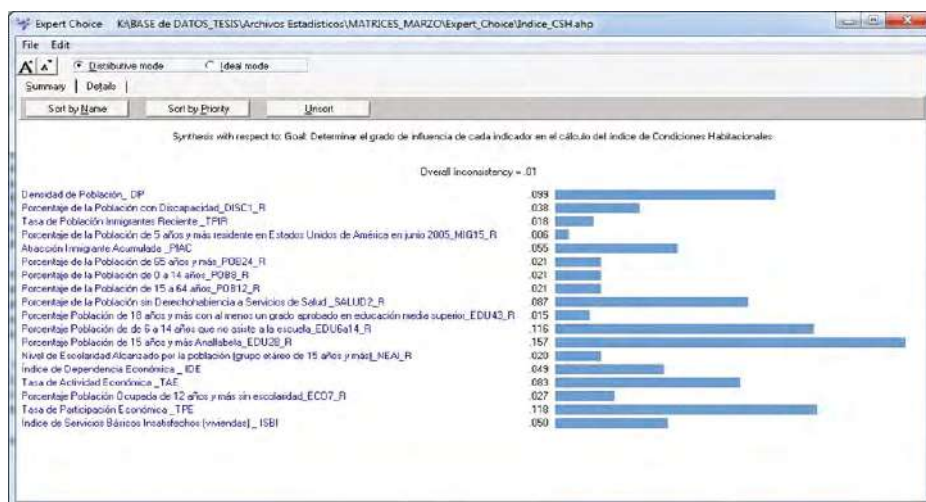


Fuente: elaboración propia.

Aproximación al análisis multivariado

Resultados del Proceso de Análisis Jerárquico. Árbol de decisiones_ICSH

Figura 10. Ejemplo de estructura de la ponderación final de indicadores, expertchoice. Obtención del Índice de Síntesis_ICSH



Fuente: elaboración propia.

A partir de la matriz de datos ponderados (MDPond _CSH), se suman los valores de forma horizontal en el sentido de las filas por cada polígono de unidad geoeológica, el resultado se incluye en una nueva columna que se identifica como “índice de síntesis” que agrupa los indicadores que se analizan de las condiciones socio-habitacionales; con ello se genera una nueva y última matriz, denominada Matriz de Datos del Índice de Síntesis de las Condiciones Socio-Habitacionales (MDSi _ICSH).

- Índice Condiciones Socio-Habitacionales.

A continuación, se muestran los rangos de valores y Categorías del Índice Condiciones Socio-Habitacionales. Es importante señalar que se realizó un estudio de distribución de frecuencias al interior del rango 2 y se determinó, del análisis cuantitativo del gráfico de barras, realizar un punto

de corte en el valor de $ISH = 2.091$, y con ello generar dos subgrupos al interior de este rango (2). De esta manera, el rango 2 se subdivide en grupo 2.1 y grupo 2.2, para el análisis cualitativo de cada categoría del Índice sumario ICSH (ver tabla 6).

Tabla 6. Resultados cuantitativos de las Condiciones Socio-Habitacionales (ICSH)

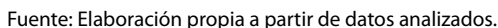
Rangos por Condiciones Socio-Habitacionales	Cant. polígonos ugs	Categorías por Condiciones Socio-Habitacionales	Población total (% en relación a la población de ZMM)	Superficie (% en relación al área total urbanizada o poblada)
3.655-4.233	36	Muy desfavorable	54 308 (6.6)	414.1 (29.4)
3.076-3.654	109	Desfavorable	83 439 (10.1)	1 3187.1 (93.4)
2.498-3.075	170	Poco favorable	383 807 (46.4)	338.4 (24)
2.082-2.497	110	Favorable a poco favorable	156 237 (18.9)	56.9 (4)
1.545-2.081	85	Favorable	145 424 (17.6)	97.3 (6.9)
0.592-1.544	52	Muy favorable	3 164 (0.4)	12.2 (0.9)
0	336	Sin población o datos no confiables	0	0
Total	898		826 379	14 106

Fuente: elaboración propia.

En resumen, la Zona Metropolitana de Morelia tiene una extensión territorial de 1 934.6 km², de los cuales se encuentran ocupados por algún tipo de urbanización o población 1 532.2 km². Al interior de esta superficie poblada o urbanizada, se obtuvo información para la evaluación de 18 indicadores e índices en un área de 1 410.6 km², de la cual, como resultado, se consideran unidades que presentan condiciones muy favorables a Favorables en una extensión del 7.8% del total, en condiciones favorables a poco favorables se ubica el 28% y en condiciones desfavorable a muy desfavorable se incrementa un área representativa del 64% (ver figura 11).

Sobre estas condiciones generales la población, de un total de 828 154 tomada como referencia, es del 17.8% bajo condiciones muy favorables a favorables, el 64.5% habita en condiciones favorables a poco favorables con tendencias a Poco Favorables y el 16.4% se encuentra afectada por condiciones desfavorables a muy desfavorables, cabe destacar que en análisis de género, bajo estas condiciones de desfavorabilidad se encuentra una cantidad relativamente mayor de mujeres, ancianas y niñas, que de hombres en los mismos grupos etarios. A partir de la diferenciación de las condiciones

Figura 11. Mapa del Índice de Condiciones Socio-Habitacionales de la Zona Metropolitana de Morelia



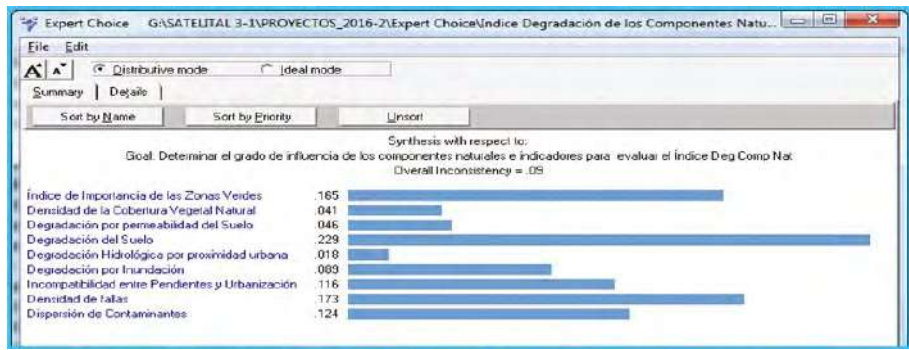
- Índice de Degradación del medio transformado

Resultados del Proceso de Análisis Jerárquico. Árbol de decisiones IDMT

A partir de la matriz de datos ponderados (MDPond_DMT), se realiza el mismo procedimiento anteriormente explicado para el índice CSH, con ello se genera la Matriz de Datos del Índice de Síntesis de Degradación del me-

dio transformado (MDSi_DMT). A continuación, se muestran los rangos de valores y categorías del índice (ver tabla 7).

Figura 12. Ejemplo de estructura de la ponderación final de indicadores, expert choice obtención del Índice de Síntesis_IDMT



Fuente: elaboración propia.

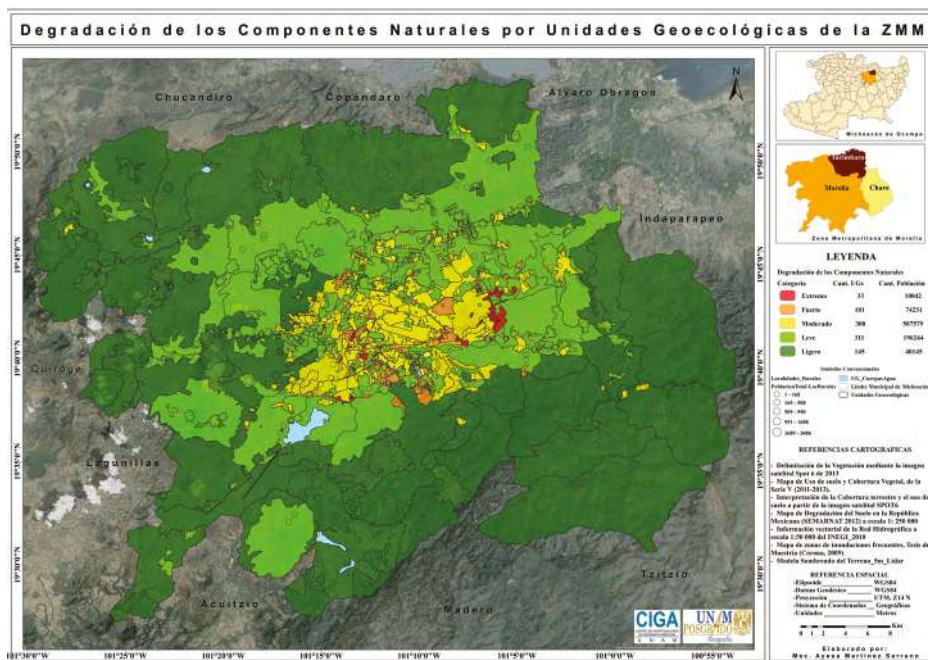
Tabla 7. Resultados cuantitativos por categorías del índice de Condiciones Físico-Geográficas y Índice de Degradación del Medio Transformado (IDMT)

Rangos por ICDMT	Cant. Polígonos UGS	Categorías por IDMT	Población total (% en relación a la población de ZMM)	Población femenina, ancianas y niñas (% del total en ZMM)	Población masculina, ancianos y niños (% del total en ZMM)	Superficie (% en relación al área total urbanizada o poblada)
0.58 – 0.92	55	Sin degradación	8597 (1)	6 187 (1.1)	5 518 (1.1)	694.7 (35.9)
0.93 – 1.60	258	Sin degradación a Poca degradación	69 679 (8.4)	47 362 (8.5)	47 214 (9.1)	1 021.3 (52.8)
1.61 – 2.28	269	Poca degradación	101 164 (12.2)	67 461 (12.2)	65 072 (12.6)	110.3 (5.7)
2.29 – 2.96	262	Degradado	300 129 (36.2)	197 676 (35.7)	184 379 (35.6)	70.5 (3.6)
2.97 – 3.79	54	Muy degradado	349 797 (42.2)	235 262 (42.5)	215 977 (41.7)	37.8 (2)
Total	898		829 366	553 948	518 160	1 934.60

Fuente: elaboración propia.

De la tabla 7 se aprecia que el mayor número de pobladores (42.2%) se encuentra en las unidades geocológicas con situación de condiciones físico-geográficas y transformaciones por infraestructuras “muy degradado”, incluso el 78% de la población; alrededor de 649 926 habitantes viven en condiciones de alta degradación del entorno natural, en espacios muy pe-

Figura 13. Mapa del Índice de Degradación del medio transformado



Fuente: elaboración propia a partir de datos analizados.

En la Zona Metropolitana de Morelia, con una extensión territorial de 1 934.6 km², se obtuvo información para la evaluación de 12 indicadores e índices. Como resultado, se consideran 54 unidades geoecológicas que no presentan degradación en sus componentes naturales, ni transformaciones por infraestructuras y se localizan en su mayoría en la zona rural; se caracterizan por estar poco habitadas, se distribuyen en un área total de 693.4 km² que representa el 35.8% de la superficie de la ZMM. En la categoría situación sin degradación a poca degradación se identifican 6 UGS en la zona urbana (2%); 71 de la zona periurbana (27%) y 185 de la zona rural (71%); se distribuyen en un área total de 1 022.5 km², lo

que representa el 52.9% del área metropolitana, es decir, las unidades con mayor superficie. Entre las unidades geoecológicas con situación poca degradación, se identifican 117 unidades en la Zona Urbana, 131 de la Zona Periurbana y 21 de la Zona Rural, que abarcan un total de 54.4 km², las cuales representan el 2.8% de la superficie total de la ZMM. Las unidades en la categoría en degradación se distribuyen en un área de 70.5 km², lo que representa el 3.6% de la ZMM en total; se distribuyen un total de 228 UGS en la Zona Urbana en una superficie de 52.3 km² lo que representa el 2.7% de la ZMM. Las unidades en la categoría muy degradada abarcan un total de 37.8 km², las cuales representan el 1.95% de la superficie total Metropolitana, se identifican 52 unidades en la ZU, 2 de la ZP y 1 de la ZR. En la zona urbana las unidades están distribuidas en una extensión de 37.2 km² que representan el 1.9% del área total, en la zona periurbana se ocupan 0.5 km² con el 0.03% de representación de la superficie total y la zona rural tiene una extensión de 0.13 km² de la misma.

- Diferenciación socioambiental de la Zona Metropolitana de Morelia

La diferenciación socioambiental en un territorio constituye un análisis del medio ambiente en un momento dado. Del análisis por categorías del diagnóstico geoecológico, encontramos que la categoría de situación de Transformación leve tiene mayor representatividad en la zona rural para una población de 107 habitantes. La situación de transformación media, se aprecia que, por la cantidad de habitantes afectados, predomina en la zona periurbana para un total de 4,303 residentes, aunque espacialmente abarcan mayor área las unidades con esta categoría al interior de la zona rural con 146 km². La situación de transformación extensiva es predominante en la zona urbana con una afectación hacia 47 411 personas, muy próxima a la zona rural con 43 008 habitantes y mayor ocupación territorial con 1 051 km². La situación de muy transformado, para la zona urbana afecta a 145 903 residentes en un área muy compactada de 31 km² y la situación de transformación extrema coincide para la zona urbana, con 432 301 habitantes.

Tabla 9. Población y superficie por municipios al interior de la ZMM por categorías del Diagnóstico Geoecológico

<i>Diagnóstico Geoecológico ZMM</i>	<i>Morelia (población/área [km2])</i>	<i>Tarímbaro (población/área [km2])</i>	<i>Charo (población/área [km2])</i>	<i>Total (población [%]/área [%])</i>
Transformación leve	17 / 353.6	74 / 43.8	16 / 49.1	107 / 446.5
Transformación media	4 976 / 161.3	1 845 / 10.5	371 / 27.5	7 192 / 199.3
Transformación extensiva	62 755 / 664.4	33 565 / 232.4	8 956 / 191.7	105 276 / 1 088.5
Muy transformado	196 077 / 93	47 521 / 12.3	11 345 / 9	254 943 / 114.3
Transformación extrema	453 844 / 82.7	8 007 / 3.4	0	461 851 / 86.1
Total (población [%]/Área [%])	717 669 / 1355	91 012 / 302.4	20 688 / 277.3	829 366/1 934.6

Fuente: elaboración propia.

Al interior de la Zona Metropolitana de Morelia se ubican los municipios de Morelia, Tarímbaro y Charo, el Diagnóstico Geoecológico para estos territorios demuestra que en el municipio de Morelia, la mayor cantidad de población se encuentra bajo categoría de situación de transformación extrema, y la mayor superficie bajo situación de transformación extensiva. Para el caso del municipio de Tarímbaro, la mayor cantidad de habitantes se encuentra bajo situación de muy transformado y su mayor extensión superficial se ubica bajo situación de transformación extensiva. Por último para el municipio de Charo, la mayor cantidad de población se encuentra bajo situación de transformación extensiva y coincide con la mayor superficie bajo esta categoría. Podemos resumir además que la mayor cantidad de población en la ZMM se encuentra bajo categoría de situación de transformación extrema, localizada en una extensión territorial muy pequeña de 86 km² (ver cuadro 9 en dirección vertical).

La diferenciación socioambiental demuestra que en el municipio de Morelia la mayor cantidad de población se encuentra bajo categoría de situación de transformación extrema, y la mayor superficie bajo situación de transformación extensiva. Podemos resumir, además, que la mayor cantidad de población en la ZMM se encuentra bajo categoría de Situación de transformación extrema, localizada en una extensión territorial muy pequeña de 86 km². Al interior de cada zona: en la zona urbana, con una extensión del 58 % del total de la ZMM y la mayor cantidad de habitantes, 432 301, se encuentra bajo categoría de situación de transformación extrema. En la zona

periurbana con una extensión de 18% del total del área metropolitana, 64 590 habitantes, se encuentra bajo categoría de Muy Transformado. En la Zona Rural, con una extensión superficial de 1 051 km² la población de 44 450 habitantes habita en la categoría de Muy Transformado.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente propuesta metodológica, esta investigación contribuye al perfeccionamiento de un sistema universal de distinción, caracterización y cartografía de los paisajes en un contexto metropolitano; el análisis exploratorio de datos espaciales nos permitió determinar características diferenciales de la situación socio-ambiental y establecer la aplicación de un método de análisis sistémico de la situación ambiental de los paisajes urbanizados y en proceso de urbanización, y demuestra sólidos y coherentes criterios basados en el análisis exploratorio de los datos espaciales aplicables a zonas metropolitanas.

La presente propuesta es una aproximación al estado o situación socioambiental, pero cabe señalar que los resultados expuestos en esta investigación tienen la posibilidad de un análisis multiescalar, regional o local para una unidad espacial administrativa o la agrupación de éstas, con diferentes indicadores y variables, por lo que puede ser generalizable a cualquier contexto territorial.

Es importante resaltar que la diferenciación socioambiental se realiza para un momento determinado, por ello, es necesario incorporar la dimensión temporal, ya que esto permite la comprensión de las dinámicas urbanas, analizar tendencias o predicciones, y explicar las causas de la degradación del ambiente físico y la desfavorabilidad del territorio. Para complementar el análisis espacial y fortalecer la comprensión de las dinámicas socioambientales, se sugiere incorporar en la metodología un enfoque longitudinal que permita evaluar los cambios temporales en las variables seleccionadas. A través del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (ESDA), se podrían analizar series temporales de datos sobre crecimiento urbano, transformación del paisaje y degradación ambiental en distintos periodos. Este enfoque posibilitaría la

identificación de patrones de cambio, facilitando la comparación entre diferentes momentos históricos y permitiendo la construcción de escenarios prospectivos. Adicionalmente, se incluirán simulaciones basadas en modelos espaciales para proyectar posibles tendencias de urbanización y sus implicaciones en la sustentabilidad territorial. De este modo, la metodología propuesta no sólo permitirá una diferenciación espacial en un momento determinado, sino que también aportará una visión evolutiva de los procesos territoriales, facilitando la toma de decisiones en la gestión ambiental y la planificación urbana.

Para fortalecer la validación de las conclusiones obtenidas, a partir de la metodología propuesta sobre la base de la Geografía Cuantitativa, es fundamental reconocer las limitaciones mencionadas anteriormente y complementar los análisis con enfoques cualitativos. La triangulación de métodos, combinando herramientas cuantitativas con perspectivas críticas y participativas, permite una visión más integral y equitativa del espacio geográfico (Bunge, 1962). De este modo, se puede mitigar el riesgo de interpretar los datos de manera reduccionista y mejorar la toma de decisiones en la planificación territorial y el desarrollo sostenible.

En general, es nuestro interés destacar las posibilidades que brinda en el contexto de los SIG y los SADE, a la vinculación entre las bases de datos gráficas y la cartografía digital, que se convierte en una herramienta de gran importancia en el análisis multivariado exploratorio, para interpretar el comportamiento estructural de los datos geoespaciales.

Referencias

- Ávila, R. (2000). El AHP (Proceso Analítico Jerárquico) y su aplicación para determinar los usos de las tierras el caso de Brasil. Informe técnico no 2. Proyecto regional "Información sobre tierras y aguas para un desarrollo agrícola sostenible." (Proyecto GCP/RLA/126/JPN). Santiago, Chile.
- Bocco, G., & Urquijo, P. (2013). Geografía ambiental: reflexiones teóricas y práctica institucional. *Región y sociedad*, 25(56), 5-102.
- Bosque, J., & Moreno, A. (1994). *Prácticas de análisis exploratorio y multivariante de datos*. Oikos-Tau.
- Buzai, G. D. (2014). *Mapas sociales urbanos* (2da ed.). Lugar Editorial.

- Buzai, G. D., & Baxendale, C. (2006). *Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica*. Ed. Lugar, GEPAMA.
- Buzai, G. D., & Baxendale, C. (2008). Clasificación de unidades espaciales mediante el uso de indicadores de planificación. Serie-publicaciones del PROEG (N° 6). Universidad Nacional de Luján.
- Buzai, G. D., & García de León, A. (2015). Balance y actualidad de la Geografía Cuantitativa. En M. Fuenzalida, G. D. Buzai, A. Moreno, & A. García de León (eds.), *Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones* (1ra ed.). Editorial Triángulo.
- Buzai, G. D., De la Cuétara, O. J., & Baxendale, C. A. (s/f). El hecho geográfico como unidad de tratamiento matricial. Revalorización en geoinformática y actuales perspectivas de aplicación en la investigación en geografía. Conferencia EGAL.
- Bunge, W. (1962). *Theoretical geography*. Lund Studies in Geography, Series C: General and Mathematical Geography.
- Carrera, M. C., & Méndez, R. (1998). El tratamiento estadístico y gráfico de la información. En C. Del Canto Fresno (ed.). *Trabajos prácticos en geografía humana*. Síntesis.
- Chasco, C. (2003). Métodos gráficos del Análisis Exploratorio de Datos Espaciales. En: *Anales. ASEPELT* [Consultado el 6 de junio de 2010]. Disponible en <http://asepelt.org/ficheros/file/Anales/2003-Almeria>
- Christaller, W. (1933). *Die zentralen Orte in Süddeutschland: Eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmäßigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städtischen Funktionen*. Gustav Fischer.
- Delgado, O. (2003). *Debates sobre el espacio en la geografía contemporánea*. Universidad Nacional de Colombia, Unibiblos.
- García de León, A. (1997). Empleo de una metodología multivariada para la clasificación de unidades territoriales. *Revista del Colegio Mexicano de Geografía*, 14, 5-20.
- Goodchild, M. F. (2010). Twenty years of progress: GIScience in 2010. *Journal of Spatial Information Science*, 1, 3-20. <https://doi.org/10.5311/JOSIS.2010.1.2>
- Guttman, E., Zorro, C., Cuervo, A., & Ramírez, J. C. (2004). *Diseño de un sistema de indicadores socio ambientales para el distrito Capital de Bogotá*. Serie Estudios y Perspectivas, Oficina de la CEPAL en Bogotá.
- Haggett, P. (1977). *Análisis locacional en geografía humana*. Gustavo Gili.
- Haggett, P. (1965). *Locational analysis in human geography*. Edward Arnold.
- Humacata, L. M. (2014). Aportes metodológicos del análisis espacial con Sistemas de Información Geográfica a la clasificación espacial en Geografía. *Revista del Departamento de Ciencias Sociales*, 3, 118-147.
- Harvey, D. (1969). *Explanation in geography*. Edward Arnold.
- Humacata, L. M. (2015). Análisis socioespacial de los partidos de la cuenca media del río Luján (Argentina), utilizando Sistemas de Información Geográfica. *Revista de Geografía Valpso*. (En línea) N° 52, 72-86. <https://doi.org/10.4067/s0718-98772015000200005>
- Lösch, A. (1940). *Die räumliche Ordnung der Wirtschaft*. Gustav Fischer.
- Martínez, A., & Bollo, M. (2017). Aplicación del enfoque geoecológico para la interpretación espacial de los niveles de urbanización. *Economía, Sociedad y Territorio*, 17(53), 115-144.

- Moreno, A. (2008). Los servicios colectivos y el desarrollo territorial: una reconsideración conceptual y metodológica actual. En A. Moreno & G. D. Buzai (coords.), *Análisis y planificación de servicios colectivos con Sistemas de Información Geográfica*. Universidad Autónoma de Madrid.
- Osorio, J. C., & Orejuela, J. P. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia et Technica*, 14(39), 20-25. <https://doi.org/10.22517/23447214.2936>
- Oropeza, M., & Díaz, N. (2007). La geotecnología y su inserción en el pensamiento geográfico. *Terra Nueva Etapa*, 23(34), 71-95.
- Perón, E., Pérez, M., & Chávez, A. A. (2007). Un esquema metodológico para el análisis de la situación socio-habitacional en una ciudad. En: *Desigualdad regional, pobreza y migración*. Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A. C. ISBN UNAM: 978-607-30-0001-7, AMECIDER: 978-607-96649-8-5.
- Santarelli, S., & Campos, M. (2002). *Corrientes epistemológicas, Metodología y Práctica en Geografía*. Editorial de la Universidad Nacional del Sur.
- Sánchez, D. C. (2007). *Contribución del análisis espacial a la ciencia y a la Geografía: el caso de los métodos clasificatorios* (tesis doctoral). Universidad del Salvador.
- Toskano, G. B. (2005). *El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

5. El análisis espacial: una herramienta para abordar problemas de la globalización. Análisis comparativo del servicio de AIRBNB en la capital del Ecuador (Quito urbano y la conurbación de Los Valles)

MICHELLE MONSERRATH REVELO SUAREZ*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.279.05>

Resumen

Este capítulo tiene como objetivo evidenciar cómo el análisis espacial se constituye una herramienta fundamental para abordar problemáticas asociadas a la globalización y la planificación urbana. En este capítulo se identificarán en posibles procesos de gentrificación impulsada por actividades económicas y plataformas digitales como Airbnb en el contexto de Quito, Ecuador. A través del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), imágenes satelitales, fotogrametría, cartografía temática y la superposición de capas y variables territorializadas, es posible identificar patrones territoriales, tendencias y escenarios georreferenciados que facilitan la toma de decisiones.

La globalización ha generado un impacto disruptivo en las dinámicas tradicionales y culturales, promoviendo la economía colaborativa como un nuevo paradigma de producción económica, que crece de forma rápida. Este modelo colaborativo, intermediado por plataformas virtuales automatizadas, redefine la interacción entre usuarios y proveedores, planteando desafíos significativos para la planificación y el ordenamiento territorial de forma silenciosa, sin pago de impuestos y no regulada. El crecimiento exponencial de bienes y servicios asociados a estas dinámicas modifica el espacio urbano, sin una planificación generando demandas específicas en términos de nuevas edificaciones, equipamientos, regulaciones y servicios

* Maestra en Planificación y Prospectiva Multiestratégica. Profesora-investigadora de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3542-8093> ; correo: michelle.revelo@iaen.edu.ec

básicos. Estas necesidades deben ser abordadas para garantizar una convivencia equilibrada y una gestión urbana sostenible en el contexto de las ciudades contemporáneas inclusive a través de plataformas web.

Palabras clave: *Planificación territorial, análisis espacial, gentrificación, urbanismo, Airbnb, turistificación.*

Introducción

Este capítulo tiene como objetivo evidenciar cómo el análisis espacial se presenta como una herramienta clave para la toma de decisiones, abordar los problemas derivados de la globalización en territorio, tales como la gentrificación impulsada por plataformas digitales como Airbnb, con un enfoque en la ciudad de Quito, Ecuador. Utilizando herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), datos alfanuméricos y gráficos, imágenes satelitales y fotogrametría, es posible identificar patrones territoriales, tendencias, variables y escenarios georreferenciados, tanto pasados como futuros, que facilitan la toma de decisiones informadas sobre el ordenamiento territorial.

La globalización ha reconfigurado las dinámicas tradicionales y culturales de las ciudades, promoviendo la economía colaborativa como un nuevo modelo económico. Este paradigma, mediado por plataformas virtuales automatizadas como Uber, Cabify y Airbnb, redefine las interacciones entre usuarios y proveedores, desafiando las estrategias de planificación urbana y territorial. El rápido crecimiento de estas dinámicas exige adaptaciones en términos de infraestructura, regulaciones y servicios básicos, buscando asegurar una convivencia armoniosa y una gestión urbana sostenible.

En las ciudades globales, el fenómeno de la renta de alojamientos informales a través de plataformas virtuales ha generado procesos de gentrificación no planificada (Deutsche & Ryan, 2015), así como la turistificación y desertificación de ciertas áreas urbanas (Smith & Williams, 1986). Este fenómeno se evidencia en ciudades como Venecia, donde el uso de Airbnb ha incrementado la especulación en los precios de renta, favoreciendo a los turistas que pagan más y durante periodos más cortos, lo que ha impulsado

a los propietarios a priorizar el alquiler a turistas, en lugar de a residentes permanentes. López-Morales (2013) destaca que este desplazamiento puede tener efectos a largo plazo, alterando la identidad local y modificando los usos de suelo. Los residentes se ven obligados por los costos de vida más altos a migrar a sectores periféricos donde el valor del suelo es más bajo y con severas limitaciones en cuanto a legalidad, servicios básicos y seguridad, con lo cual también se ve comprometida la tenencia de la tierra rural y la soberanía alimentaria.

La gentrificación, un fenómeno global relacionado con el nuevo colonialismo urbano, se ha expandido más allá de las grandes metrópolis, afectando también a ciudades intermedias y capitales, especialmente en América Latina. Según Janoschka *et al.* (2014), este proceso se ha materializado en ciudades latinoamericanas a través de políticas neoliberales que fomentan la intervención del sector privado, particularmente en el mercado inmobiliario, el comercio y el turismo, lo que ha provocado transformaciones socioespaciales en zonas previamente marginalizadas.

La Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo (LOOTUGS), promulgada en 2016, establece lineamientos claros sobre el uso y gestión del suelo en Ecuador. Según el Artículo 18, el suelo urbano se define como aquel ocupado por asentamientos humanos que cuentan, total o parcialmente, con infraestructura básica y servicios públicos, formando un sistema interconectado de espacios públicos y privados. Además, el Artículo 19 distingue el suelo rural como aquel destinado principalmente a actividades agroproductivas o extractivas, o aquel que debe ser protegido por sus características biofísicas o geográficas y que está reservado para usos urbanos futuros. Estas definiciones establecen un marco normativo que debe ser considerado al evaluar los impactos de la expansión urbana y las dinámicas económicas impulsadas por plataformas digitales.

En el caso de Quito, el fenómeno de la gentrificación asociado a plataformas como Airbnb plantea desafíos para el ordenamiento territorial y la equidad en el acceso a la vivienda. La ciudad ha experimentado un auge en el turismo tanto nacional como internacional, lo que ha sido acompañado por una falta de políticas actualizadas que regulen adecuadamente el uso de plataformas digitales en el sector de la vivienda. Aunque en 2016 se establecieron ciertos requisitos para los alojamientos turísticos, la falta de

control y regulación efectiva sobre la oferta informal de Airbnb ha permitido el surgimiento de una economía paralela que no sólo escapa de los tributos municipales, sino que también genera desequilibrios en el mercado inmobiliario.

Este capítulo se propone analizar cómo el servicio de alojamiento informal a través de Airbnb ha influido en la distribución territorial de Quito, particularmente antes y después de la pandemia de Covid-19. Se busca identificar los patrones de crecimiento urbano y las áreas con mayor densificación del servicio de alojamiento, así como las razones detrás de estas concentraciones. Además, se explorarán posibles implicaciones a largo plazo, como la gentrificación y los desplazamientos asociados a la turistificación del espacio urbano. A través del análisis de herramientas geográficas, este estudio pretende generar un diagnóstico anticipado sobre cómo la plataforma está configurando el paisaje urbano de Quito, proporcionando información esencial para la planificación territorial y la futura regulación al respecto.

Criterios metodológicos

La metodología adoptada en este estudio sobre la oferta de alojamiento informal a través de la plataforma Airbnb en la ciudad de Quito se fundamenta en un análisis integral que combina enfoques geográficos, tecnológicos, económicos y sociales. El propósito principal es examinar el impacto de esta modalidad de alojamiento en el territorio urbano, utilizando marcos teóricos relevantes y herramientas cuantitativas y cualitativas para evaluar las dinámicas de gentrificación y sus efectos en la estructura social y económica de la ciudad. El estudio se fundamenta en tres ejes teóricos principales:

Teorías geográficas y modelos espaciales: se utilizó la Ley de Tobler (TFL, Tobler, 1970) como base para analizar la proximidad y correlación espacial entre los alojamientos ofertados en Airbnb. Esta ley postula que los elementos geográficos más cercanos tienden a presentar mayores similitudes, lo que permitió identificar patrones de densificación y posibles procesos de gentrificación.

Teoría de la innovación disruptiva: propuesta por Clayton Christensen (1995), esta teoría fue empleada para comprender cómo Airbnb ha trans-

formado el mercado turístico, desplazando a actores tradicionales como las cadenas hoteleras y generando impactos territoriales significativos.

Teorías prospectivistas: se aplicaron métodos prospectivos, como la matriz de impactos cruzados, para evaluar escenarios futuros y variables estratégicas relacionadas con la gentrificación y la turistificación.

En primer lugar, se utiliza un enfoque espacial apoyado por la teoría de la Ley de Tobler (1970), que sostiene que las entidades geográficas más cercanas tienden a estar más relacionadas entre sí. A través de esta ley, se analizan las relaciones espaciales y la proximidad de los alojamientos disponibles en Airbnb, permitiendo identificar patrones de densificación que podrían estar asociados con procesos de gentrificación. La correlación entre la proximidad de estos alojamientos y la transformación de los barrios urbanos es medida y analizada de manera cuantitativa, con el fin de explorar las dinámicas de desplazamiento de la población y la reconfiguración del espacio urbano.

A su vez, se incorporan las teorías de la economía colaborativa y el impacto de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en la transformación de los servicios turísticos. Siguiendo las propuestas de autores como Cañas-Barrigas (2018), se considera cómo las TIC no sólo modifican los servicios ofrecidos por empresas como Airbnb, sino también cómo estas tecnologías emergentes reconfiguran la gestión del territorio y fomentan una nueva economía que desafía las regulaciones del mercado tradicional, afectando tanto la eficiencia como la sostenibilidad del territorio.

Además, se aborda el concepto de innovación disruptiva formulado por Clayton Christensen (1995), que proporciona un marco útil para comprender cómo Airbnb ha logrado transformar el sector turístico tradicional. Inicialmente concebido como un servicio de nicho, Airbnb ha evolucionado hasta convertirse en un actor dominante que afecta la estructura de los mercados turísticos y de alojamiento en las grandes ciudades, como Quito. Esta transformación es analizada en el contexto de la gentrificación urbana, donde el auge de nuevos modelos de alojamiento puede llevar a un desplazamiento de la población original y a una revalorización de los terrenos urbanos.

En cuanto a la evaluación de la gentrificación, se emplea el concepto de *rent gap* propuesto por Smith y Williams (1986), que describe cómo los barrios previamente desinvertidos experimentan una revitalización impulsada por el aumento de los precios de los bienes raíces, lo cual es facili-

tado por la inversión en infraestructuras y servicios. La gentrificación, según este enfoque, no sólo está vinculada al aumento del precio del suelo, sino también a la transformación del perfil socioeconómico de los residentes, lo que podría estar relacionado con la introducción de alojamientos turísticos como los ofrecidos en Airbnb.

En términos metodológicos, el estudio utiliza una combinación de datos cuantitativos y cualitativos. Se lleva a cabo un análisis multitemporal utilizando herramientas geoespaciales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la interpretación de imágenes satelitales de la plataforma Planet. Este análisis permite observar la evolución del servicio de alojamiento de Airbnb en Quito a lo largo del tiempo, y cómo se superpone con cambios en la estructura social y económica de los barrios urbanos. Además, se realizan entrevistas con expertos y actores clave para complementar los datos cuantitativos y proporcionar un contexto más profundo de los procesos observados.

Finalmente, se utiliza la matriz de impactos cruzados, un método prospectivo que ayuda a identificar las variables estratégicas que podrían influir en el futuro del alojamiento informal en la ciudad. Este enfoque permite anticipar los posibles impactos de la expansión de Airbnb en el desarrollo urbano y en la planificación territorial, con el objetivo de ofrecer recomendaciones sobre la regulación y el manejo sostenible de esta actividad.

En conjunto, la metodología aplicada en este estudio es mixta, ya que integra análisis cuantitativos y cualitativos con herramientas geoespaciales avanzadas y teorías contemporáneas sobre innovación, economía colaborativa y gentrificación. Esto permite una evaluación holística de los efectos de Airbnb en el territorio urbano de Quito, destacando tanto las oportunidades como los retos asociados a su crecimiento en el contexto local.

Tabla 1. Descripción de la metodología

Área de estudio	Descripción de la metodología
Análisis espacial	Uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para visualizar y analizar la distribución de alojamientos en Airbnb.
	Aplicación de técnicas estadísticas y matemáticas para medir distancias, correlaciones y patrones de densificación.
	Incorporación de imágenes satelitales y datos multitemporales para evaluar cambios en la dinámica urbana global del límite urbano.

<i>Área de estudio</i>	<i>Descripción de la metodología</i>
Identificación de variables estratégicas	Análisis de variables como presencia de visitantes en áreas centrales, reorientación de negocios hacia el turismo, conversión de viviendas en productos turísticos y creación de paisajes urbanos turísticos.
Evaluación de Impactos Territoriales	Aplicación del concepto de <i>rent gap</i> (Smith y Williams, 1986) para entender los mecanismos de desinversión y reinversión en barrios gentrificados.
	Análisis de políticas públicas locales para evaluar su impacto en la promoción o desincentivación de la gentrificación.
Triangulación de Datos	Combinación de datos cuantitativos (estadísticas, análisis espacial) con datos cualitativos (entrevistas con expertos, criterios de actores clave) para validar los hallazgos.
	Estudio exploratorio para identificar patrones y corroborar hipótesis sobre gentrificación y turistificación.
Métodos Prospectivos	Aplicación de la matriz de impactos cruzados para identificar variables estratégicas y proyectar escenarios futuros.
	Evaluación de los impactos a largo plazo de la oferta de alojamiento informal en la estructura urbana y socioeconómica de Quito.

Método de recolección de datos

El levantamiento de información de los alojamientos de Airbnb fue a través de *Google MyMaps* y la plataforma oficial del servicio de alojamiento. Estos datos fueron levantados de forma multitemporal en dos periodos 2018 y 2022 a una escala 1:5.000 antes y post pandemia de Covid-19. Así mismo, la información fue sometida a una valoración y verificación de fuentes para no dejarse engañar por falsas evidencias; en este sentido, se evaluó con los expertos las probabilidades de ocurrencia de un evento a la luz de la información más reciente para el análisis, porque pueden cambiar de forma aleatoria (Pino, 2008). Esta información no es únicamente cualitativa, sino también cuantitativa y espacial misma que respalda las condiciones actuales e históricas, para corroborar y analizar datos multitemporales. A continuación, se muestra la operacionalización de indicadores que resultado del modelo ACP para el análisis de la dinámica espacial de la plataforma Airbnb y su integración con las estructuras territoriales locales de Quito urbano.

Tabla 2. Operacionalización de indicadores para el análisis espacial del servicio de alojamiento Airbnb

<i>Variables</i>	<i>Indicadores</i>
INTERNAS	Número de alojamientos de Airbnb 2018.
	Número de alojamientos de Airbnb 2022.
	Número de personas por sector censal que tienen computadora.
	Número de personas por sector censal que tienen internet.
	Número de personas por sector censal que tienen teléfono.
	Número de personas por sector censal que tienen celular.
	Número de personas por sector censal que tienen tv por cable.
	Número de personas por sector censal que tienen ducha personal.
	Número de personas por sector censal que tienen baño personal.
	Número de personas por sector censal que tienen cocina.
	Número de personas por sector censal que asisten a un establecimiento educativo particular.
	Número de personas por sector censal que asisten a un establecimiento educativo fiscal.
	Número de personas por sector censal que se dedicaron como profesión a la enseñanza.
	Número de personas por sector censal que se dedicaron como profesión a la ciencia.
	Número de personas por sector censal que se dedicaron como profesión al comercio.
	Número de personas por sector censal que se dedicaron como profesión a la salud.
	Número de personas por sector censal que se dedicaron como profesión a las finanzas.
	Número de personas por sector censal que se dedicaron como profesión a la comunicación.
	Número de personas por sector censal que se dedicaron como profesión a la construcción.
	Número de personas por sector censal que se dedicaron como profesión a la electricidad.
	Número de personas por sector censal que se dedicaron como profesión al transporte.
	Número de viviendas por sector censal que tiene tubería dentro de la vivienda.
	Número de viviendas por sector censal que reciben luz eléctrica de la empresa eléctrica de Quito.
	Número de viviendas por sector censal que tienen alcantarillado.
	Número de viviendas por sector censal que reciben agua mediante una red pública.
	Número de viviendas por sector censal que tienen vías de acceso pavimentadas.
	Número de viviendas por sector censal que tienen paredes en buen estado.
	Número de viviendas por sector censal que tienen focos de ahorro.
	Número de personas por sector censal que son bilingües.
	Número de personas por sector censal que son hogares unipersonales.
	Número de personas por sector censal que utilizan el servicio sanitario.
ESPACIALES	Relaciones topológicas.
	Relaciones de superficie polígonos de Voronoi ¹ .

Fuente: elaboración propia con información de INEC (2010), Airbnb (2018), Airbnb (2022), Revelo (2022).

¹ Distribución espacial de la demanda y sus distancias, consiste en comprobar cuales son las áreas de influencia con la finalidad de verificar el alcance del servicio a partir de sus centralidades. El procedimiento es mediante un mosaico realizado a partir de puntos equidistantes (teoría del lugar central de Christaller), la existencia ideal de un mosaico irregular a partir de la localización real de los puntos. La finalidad del mosaico es diferenciar la proximidad, polígonos más grandes, menos proximidad; polígonos más pequeños, mayor proximidad.

Una vez identificadas las variables del censo de población que inciden en la dinámica espacial de Airbnb y su integración con las estructuras territoriales locales de Quito urbano mediante la recopilación de información y análisis espacial. Se presenta a los expertos el inventario de variables para seleccionar las consensuadas según su nivel de experticia.

Análisis de los datos

El análisis espacial llevado a cabo en esta investigación permitió visualizar y comprender la dinámica de la plataforma Airbnb en la ciudad de Quito, vinculando dicha dinámica con las estructuras territoriales locales. Para ello, se utilizó el *software ArcGIS 10.5*, empleando específicamente la herramienta Polígonos de Voronoi del *ArcToolbox* para evaluar la proximidad de los alojamientos ofertados en la plataforma. Esta técnica facilitó la determinación de la distribución geográfica y la identificación de patrones espaciales relacionados con la localización de los alojamientos, en función de su cercanía a puntos de interés clave en la ciudad.

Para el Análisis de Componentes Principales (ACP), se utilizaron los datos del Censo 2010 de Hogar y Vivienda, los cuales fueron procesados a nivel de sector censal. A través de este proceso, se seleccionaron un conjunto reducido de predictores que permitieron modelar la variable objetivo: el nivel socioeconómico de las familias quiteñas. El objetivo de este análisis fue identificar patrones de correlación entre el nivel socioeconómico de las familias y la oferta de alojamiento en la plataforma Airbnb.

Para identificar los posibles conflictos socioespaciales derivados del servicio de alojamiento informal de Airbnb, se hizo un inventario de variables clave mediante talleres con expertos en urbanismo, geografía y desarrollo territorial. Este inventario permitió identificar aquellas variables que, por su relevancia y capacidad de influencia, podrían generar impactos en el territorio.

Las variables identificadas fueron analizadas utilizando la Matriz de Impactos Cruzados con Multiplicación Aplicada a una Clasificación (MIC MAC), un método de análisis prospectivo que permite establecer relaciones entre las variables del sistema estudiado y las del entorno. Este enfoque facilita la evaluación de los niveles de influencia y dependencia de cada variable, lo que a su vez permite determinar cuáles son las más determinantes para la evolución del sistema urbano y las dinámicas territoriales.

Como resultado de la aplicación de la MIC MAC, se lograron identificar las variables clave que influyen en los posibles conflictos socioespaciales generados por el crecimiento del servicio de Airbnb en Quito. Además, se estableció una zona de conflicto, donde las tensiones derivadas de los impactos socioeconómicos y urbanos son más intensas.

El *método de abstracción* aplicado en este estudio establece conclusiones específicas a partir de la descomposición de la realidad territorial, considerando los diversos factores internos y externos que afectan el servicio de alojamiento de Airbnb. Este enfoque permitió reconstruir un modelo espacial a partir de la simplificación y abstracción de la realidad, brindando una visión clara de las interacciones y la organización del espacio urbano, conforme a los distintos factores sociales y económicos involucrados (Pillet, 2004). Sumado al método cartográfico que permitió interpretar por medio de mapas los diferentes hechos y fenómenos geográficos del espacio, elementos o variables y sus relaciones (Escobar, 2004) y finalmente el método prospectivo permite anticiparnos a los posibles escenarios de una gentrificación no planificada.

A fin de analizar las estructuras territoriales locales de Quito se adoptó la metodología ACP o Análisis por Componentes Principales es uno de los métodos estadísticos de minería de datos, a fin de identificar las principales variables que confluyen en las diferentes estructuras territoriales en la ciudad de Quito con la información de población, hogar y vivienda del censo 2010.

Discusión

Crecimiento urbano

Imagen 1. Multitemporal de imágenes gratuitas del satélite de Planet

Fuente: Planet, 2017-2024.

Mediante imágenes satelitales se identifica, mediante un análisis comparativo e histórico, el crecimiento urbano de Quito y la conurbación de los Valles. Se ha comparado dos imágenes mediante el geovisor de imágenes satelitales de Planet, de diciembre 2017 y octubre del 2024, donde se identifica a gran escala la densificación urbana a lo largo de la urbe y principalmente en Los Valles.

Como se puede apreciar en las imágenes multitemporales presentadas, la expansión de la mancha urbana de Quito mantiene su núcleo central, pero se evidencia un crecimiento significativo en los límites y periferias de la ciudad. Este patrón de expansión sugiere un proceso de urbanización en el cual las áreas periféricas experimentan un fortalecimiento de la infraestructura y la edificación. Aunque la escala de las imágenes satelitales utilizadas no permite observar detalles finos de los objetos en el terreno, los cambios en la estructura espacial de la ciudad son claros. Este crecimiento en las áreas externas está acompañado de un proceso de consolidación territorial que refleja una tendencia creciente hacia la ocupación de estos espacios previamente menos urbanizados.

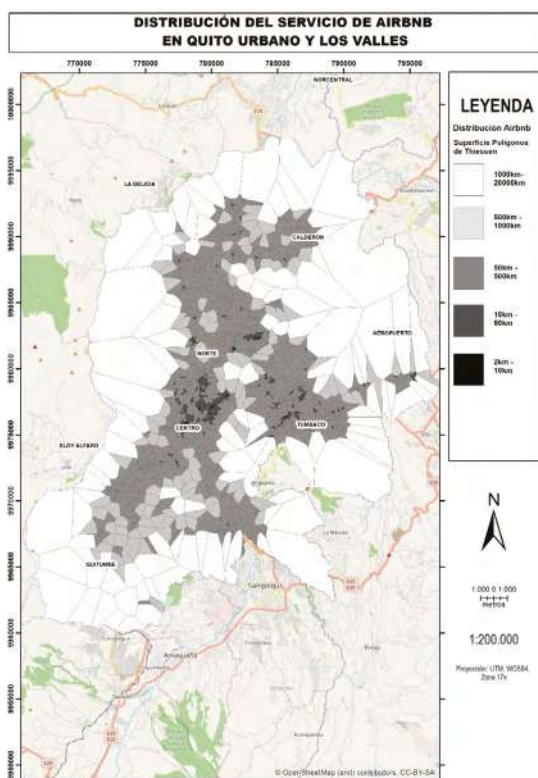
Cabe destacar que el crecimiento urbano de Quito presenta características de tipo vertical, lo que indica una mayor concentración de edificaciones en áreas ya desarrolladas, especialmente en el centro urbano. Este tipo de expansión vertical no sólo refleja un fenómeno de densificación, sino que también sugiere una adaptación a la limitación de espacio en el núcleo urbano, favoreciendo la construcción de edificaciones de mayor altura. Este

patrón de crecimiento vertical es indicativo de un proceso de urbanización intensiva, que busca optimizar el uso del suelo en un contexto de limitaciones geográficas y demandas habitacionales crecientes.

Distribución de los alojamientos

Mediante análisis de proximidad y la triangulación de Thiessen, se identificaron las zonas de mayor densificación del servicio de alojamiento en Airbnb en Quito, durante el año 2018, así como su proyección de expansión futura. La forma territorial de Quito, caracterizada por su extensión longi-

Imagen 2. Polígonos de Voronoi del Servicio de Airbnb en Quito Urbano y Los Valles con datos del servicio de alojamiento Data 2018



Fuente: elaboración Propia.

tudinal, presencia de formaciones volcánicas activas, como el Pichincha, un volcán que se encuentra al oeste de la ciudad que históricamente ha influido en la distribución territorial de la misma. Esta geografía volcánica y la presencia de otras formaciones geológicas, como domos y montañas, genera una gran diversidad de terrenos, lo que afecta la planificación urbana y la capacidad de expansión de la ciudad. Quito está asentado en suelos de relleno aluvial con características variables que afectan el desarrollo urbano, como la inestabilidad en algunas zonas, lo cual genera desafíos para la construcción y el desarrollo de infraestructuras permanentes. A pesar de la solidez relativa de estas áreas, existen riesgos de deslizamientos de tierra debido a la topografía empinada y a la intervención humana.

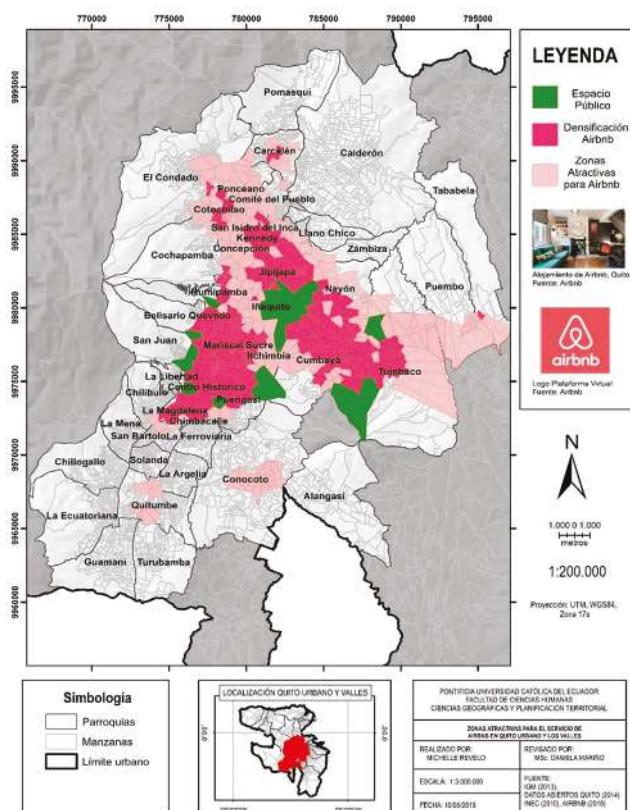
A pesar de la geografía accidentada, ha implementado equipamientos y servicios para mejorar el sistema de transporte de la ciudad con la implementación del Metro subterráneo, que facilita el tránsito rápido entre el norte, centro y sur de la ciudad, mejorando la conectividad en las zonas más densamente pobladas.

En el levantamiento de datos del servicio de alojamiento informal de Airbnb para el año 2018, se registraron 1 501 alojamientos a lo largo de la urbe (Revelo, 2022), con cuatro principales núcleos de concentración del servicio: el Centro Histórico, Mariscal Sucre, Jipijapa y Cumbayá, áreas que se destacan en el análisis espacial por su alta densificación, representadas en un tono rosado intenso en la imagen 3.

A pesar de esta concentración, se observa una proyección de mayor densificación en el área Centro-Norte y Los Valles, lo que sugiere una expansión de la oferta de alojamiento en estas zonas, en el futuro cercano. En cambio, en el sector sur, la continuidad del servicio de alojamiento es más dispersa e intermitente, a pesar de que áreas como Quitumbe, con su importante terminal terrestre, podrían atraer a turistas provenientes de otras regiones de la ciudad, gracias a sus costos de vida más bajos y la cercanía a la terminal.

Bajo el marco de la Ley de Tobler, se empleó un análisis de polígonos de Voronoi para visualizar la distribución del servicio de Airbnb en 2018. Este análisis permitió identificar las zonas con mayor densificación, representadas mediante teselas: las áreas con polígonos más pequeños indican mayor correlación y, por lo tanto, mayor concentración del servicio. Entre las zonas con una alta densificación y una mayor exposición a posibles procesos de

Imagen 3. Zonas de Densificación del Servicio de Airbnb en Quito Urbano y Los Valles, con datos del servicio de alojamiento Data 2018



Fuente: Revelo, 2022.

gentrificación se encuentran, de norte a sur, áreas como Jipijapa, Belisario Quevedo, Mariscal Sucre, Itchimbía, el Centro Histórico y, en Los Valles, Cumbayá. Estas zonas se presentan como puntos críticos donde el servicio de alojamiento tiende a concentrarse, transformando el espacio urbano y propiciando cambios en las dinámicas sociales y económicas.

No obstante, aunque estas áreas muestran una fuerte correlación con la oferta de alojamiento, es crucial realizar un diagnóstico más profundo que considere factores como la demanda del servicio, el valor del suelo y los posibles desplazamientos de población. Es posible que, en un análisis multitemporal, esta densificación se vea corroborada, lo que permitiría evaluar

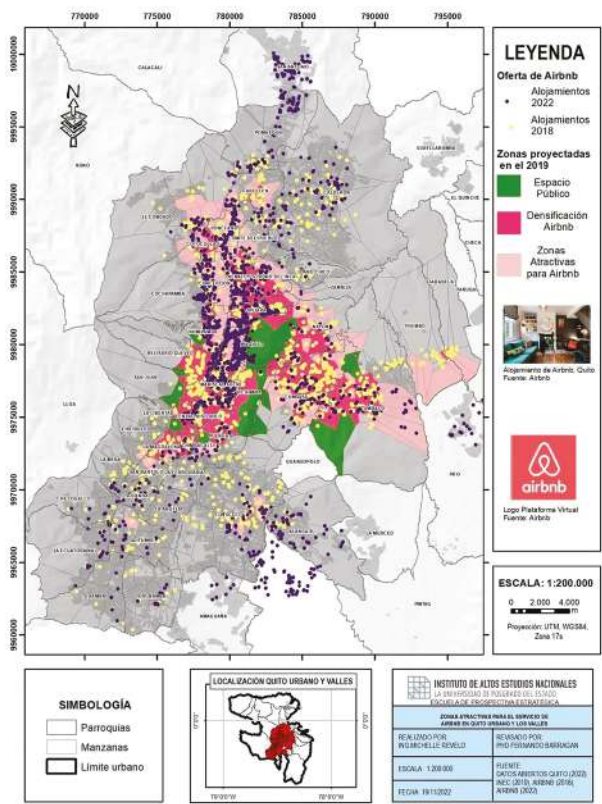
con mayor precisión los impactos urbanos y sociales de la oferta de alojamiento informal en estas zonas.

La belleza de la ciudad es clave a la hora de ofertar un servicio de alojamiento en la plataforma virtual, que es palpable en los altos costos de renta de alojamiento de Airbnb, el centro de la ciudad condensa la riqueza, la cultura, los símbolos, los hitos más tradicionales de la población Quiteña. La mayoría de la inversión pública se ha destinado a fortalecer la conexión centro-norte, esto a concatenado en inequidades territoriales entre el norte y centro con respecto al sur de Quito. El ordenamiento territorial que existe en el centro norte y Valles no es el mismo que ha sido en el sur. Al sur de Quito existen mayores problemas de invasiones, fraccionamientos no planificados, asentamientos informales.

Frente a la pandemia de Covid-19 se proyectaba un declive en la oferta y demanda del servicio de alojamiento mediante la plataforma Airbnb. Sin embargo, el resultado de las múltiples campañas de la plataforma a fin de promover un alojamiento seguro con medidas de protección y aislamiento, sumado al desempleo, se visualiza que tuvo un crecimiento de la oferta de alojamientos para el año 2022. En el mapa se representa con puntos de color morado, los alojamientos ofertados en Airbnb actualizados al año 2022 y los puntos de color amarillo, de los alojamientos ofertados en el 2018. A partir del contraste de estos dos periodos se colige un crecimiento del servicio a lo largo de Quito en tan sólo cuatro años, con nuevas ofertas y diferentes barrios tanto al sur como al norte y en Los Valles. Sin embargo, el patrón de densificación de la oferta a los servicios predomina en el Centro Histórico que tiene un componente turístico, hacia el norte y valles. Al sur se visualiza una oferta de tipo dispersa. En contraste, al 2018 se evidencia la densificación de las zonas atractivas para Airbnb, como ya se había proyectado, por lo tanto, es necesario prestar atención a estos procesos de densificación e identificar anticipadamente procesos de gentrificación.

El director Brian Chesky, de Airbnb, mencionó en una entrevista que lo que se tardó en construir más de 10 años se perdió en cuestión de semanas. Existió una fuerte incertidumbre en cuanto al turismo, pero por la base de datos que manejaba reconoció que no perdió ningún alojamiento durante la crisis, a pesar de que no se rentara. Sin embargo, se observó un fenómeno inusual: aumentó la oferta, es decir el número de alojamientos durante la

Imagen 4. Zonas de densificación del servicio de Airbnb en Quito Urbano y Los Valles



Fuente: Revelo, 2022.

Imagen 5. La Tola Tradicional, barrio ubicado en el centro de Quito



Fuente: Secret Garden, 2018.

crisis sanitaria (Chesky, 2020). En ese sentido la empresa implementó protocolos de bioseguridad como son el uso de mascarillas, distanciamiento social, y que los anfitriones debían cumplir con procesos de limpieza avanzada (Airbnb, 2022). En ese sentido, se colige que el hecho de que no se hayan perdido alojamientos se explica que, por la pérdida de empleos durante la pandemia, las personas buscan inversiones alternativas y emergentes, principalmente en economías colaborativas mediadas por lo tecnológico: entrega de bienes, alquiler de casas, autos, entre otras.

El centro norte de la urbe y Los Valles tiene alta densificación del servicio de alojamiento, a pesar de las implicaciones e impacto que tuvo el evento disruptivo Covid-19, en el año 2020. El número de alojamientos de Airbnb para este año es de 1 740. En cinco años aumentaron alrededor de 239 alojamientos a pesar de la crisis sanitaria declarada el 11 de marzo del 2020 por la ONU. En el año 2020 la pandemia redujo el número de turistas, en un 69.0% y en los primeros meses del 2021 se registra una caída del 80.2% (MINTUR, 2021).

Al dimensionar la oferta de alojamientos de Airbnb se identifica que el espacio público es reducido. Los gobiernos locales y las políticas públicas con este diagnóstico evidencian que han fortalecido las alianzas público-privadas que han promovido la urbanización de las zonas rurales, como fueron Carcelén y Cumbayá, esto en cuanto a la mercantilización del suelo, ya que el precio del uso de la tierra en las periferias es más barato. ¿A qué modelo responde este proceso? ¿Estaríamos hablando de la reproducción del modelo estadounidense ligado con la privatización del espacio y la ruptura del tejido comunitario a través de conjuntos cerrados y grandes centros comerciales? O, por el contrario, ¿es un proceso singular que combina diferentes tipos de transformación estructural? Y finalmente, ¿podríamos hablar de un fenómeno de gentrificación con nuevas centralidades? (Durán, Costa, y Mérida, 2016). Los equipamientos y servicios se han reducido y ya son insuficientes para la oferta y demanda de la inserción de grandes inmobiliarias que apuestan este negocio de alojamientos por plataforma Airbnb. Uno de los principales centros comerciales denominado el Portal y Escala se han ubicado en las periferias de Quito. Los grandes inversionistas de no ver una zona estratégica mediante estudios, no hubiesen invertido en estos grandes centros comerciales.

En Barcelona hay cerca de un millón de viviendas, la oferta de Airbnb data de 17 000 anuncios, lo que representa el 1.7% de las viviendas, dada esta cifra a nivel general se puede deducir que impacto de la plataforma es mínimo; sin embargo, el problema es la concentración de este servicio en los siete barrios más turísticos de Barcelona que representa la mitad (50.91%) de la oferta global de la ciudad (Verdú, 2015), la oferta y la demanda no logran mantener un equilibrio y sigue creciendo la oferta a pasos agigantados, modificando la planificación urbana sin estabilidad ni garantías para la población.

En la Tola Tradicional, barrio ubicado en el centro de Quito, el precio de renta es bajo porque los equipamientos están en un estado de regular a malo, se convirtió en un gueto, barrio inseguro por la proximidad al mercado central. Sin embargo, por su ubicación, tradición y cercanía a los hitos históricos, sumados a su belleza arquitectónica y patrimonial, se están instalando nuevos servicios de alojamiento y diversión, a la vez que se está viendo un cambio en la dinámica tradicional; los gobiernos locales hacen obras de mejoramiento vial y regeneración urbana. Este barrio se convirtió en un centro de diversiones con la instauración de cafeterías, bares, pizzerías y restaurantes. Poco a poco la población ha ido desplazando y en la actualidad sólo hay ofertas para turistas (Rosero, 2018).

La ciudad se está convirtiendo en una marca, la gente de estrato social más alto forma centralidades y revive los lugares peligrosos. Compran activos inmobiliarios baratos, los transforman y los venden cuando el precio del suelo se ha llegado a triplicar mediante normativa; en este escenario la especulación y las políticas públicas juega un papel importante. Finalmente, el proceso concluye una vez que se genera una limpieza social, se reconstruyen los espacios y se expulsa a los estratos bajos a los suburbios periféricos.

Por el contrario, el barrio de La Mariscal, es una zona que ha experimentado una transformación significativa en los últimos años. Originalmente, este sector estaba planificado como la “Zona Rosa” del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), donde la actividad económica predominante era la diversión nocturna para adultos, caracterizada por una alta concentración de bares y discotecas. Esta concentración le otorgó una identidad como el centro de la vida nocturna de la ciudad, convirtiéndola en un lugar de gran afluencia de jóvenes locales y turistas; sin embargo, con el tiempo,

Imagen 6. Fotogrametría del sector La Mariscal

Fuente: municipio del DMQ, 2024.

la dinámica urbana ha cambiado drásticamente, y La Mariscal ha sufrido un proceso de desertificación y creciente inseguridad.

Mediante el uso de análisis espacial y fotogrametría (imagen 7), se ha identificado la evolución de la normativa urbana y las edificaciones en el sector, revelando una compleja interacción entre el crecimiento descontrolado y la falta de intervención planificada en el uso del suelo. La fotogrametría proporcionada por el Municipio del DMQ en 2024, permite visualizar de manera precisa los cambios en las construcciones y en las regulaciones que rigen la zona.

En la actualidad, las políticas urbanas y los planes de uso y gestión del suelo apuntan a un crecimiento vertical de tipo residencial, con la intención de transformar esta área en un centro urbano más orientado a la vivienda, debido a su proximidad a varios clústeres educativos, como la Pontificia Universidad Católica, la Universidad Salesiana y la Politécnica Nacional. Sin embargo, este tipo de desarrollo tiene riesgos implícitos: si no se implementan adecuadas regulaciones en el uso y la ocupación del suelo, se corre el riesgo de que estos procesos de gentrificación se aceleren, desplazando a

los residentes originales y promoviendo una transformación socioeconómica no deseada.

Lo que hace peculiar este caso es la paradoja de que, a pesar de su ubicación privilegiada cerca de centros educativos de alta demanda, la zona ha dejado de desarrollarse como se esperaba. El cambio de funciones económicas (de entretenimiento a uso residencial) y la degradación social han provocado que La Mariscal pierda su atractivo tanto para los estudiantes como para otros grupos sociales. La inseguridad, la baja rentabilidad en los alquileres debido a la especulación inmobiliaria, y la colonización por grupos informales (incluyendo migrantes y actividades ilícitas como el microtráfico) han generado un entorno social y económico deteriorado.

A pesar de los desafíos, el municipio de Quito está formulando planes parciales para la reactivación de este sector, orientados principalmente a su conversión en una zona residencial. Estos planes, sin embargo, deben considerar cuidadosamente el impacto de la gentrificación y la expansión del servicio de alojamiento informal, como el caso de Airbnb, que ha tenido una notable presencia en La Mariscal entre los años 2018 y 2022 (ver imagen 5). Este fenómeno no sólo afecta el mercado inmobiliario, sino también el carácter social y cultural del barrio, generando tensiones entre la comunidad local y los nuevos actores económicos.

En este sentido, se requiere un diagnóstico preciso de la situación actual del sector, con el fin de anticipar los efectos que podría tener el proceso de gentrificación y su relación con la creciente oferta de alojamiento turístico. Es imperativo que los planes de revitalización sean inclusivos y sostenibles, para evitar la expulsión de los residentes originales y la consolidación de un modelo urbano que favorezca a ciertos grupos sociales y económicos en detrimento de otros.

Finalmente, La Mariscal, como una de las centralidades de la ciudad, presenta un nicho de mercado potencial, en términos de alojamiento turístico. El análisis de las dinámicas espaciales y de las políticas urbanas debe estar alineado con una visión integral que contemple tanto el desarrollo de la infraestructura urbana como la regulación de servicios, como Airbnb, con el objetivo de crear un barrio más seguro, inclusivo y equilibrado para sus habitantes y visitantes

En el 2018, a través del servicio web AirDNA² se identificó que los alojamientos del servicio de Airbnb representan el 74,33% departamentos enteros; 22.14% habitaciones privadas; 2.96% casa entera y otros varios tipos de alojamiento que se encuentran disponibles (Cañas-Barrigas, 2018). Estos datos dan la pauta de que el servicio ofertado de Airbnb en su mayoría es de departamentos que se ajustan a los nuevos modelos sociales del incremento del individualismo y crecimiento vertical de las urbes, con espacios más funcionales y reducidos. En este sentido, las grandes inmobiliarias pueden ver a la plataforma como un nicho de mercado para ofertar sus bienes. Reemplazar casas por edificios termina siendo más rentable, siempre y cuando la normativa les permita transformar la ocupación y edificación del suelo.

Imagen 7. Escenario tendencial del crecimiento urbano en el sector de La Mariscal



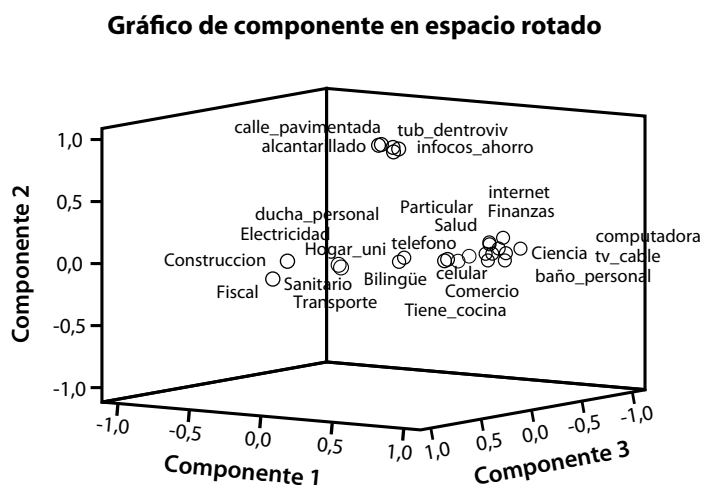
Dinámica espacial de Airbnb y estructuras territoriales locales de Quito Urbano

Desde la teoría geográfica, el análisis espacial de la mano del análisis por componentes principales, permite elaborar un análisis completo de las estructuras territoriales de la urbe.

² AirDNA: Market Minder Quito - Ecuador. Plataforma web de datos pagados y actualizados de la oferta servicio de Airbnb.

En Quito se identificaron tres diferencias de grupos sociales y económicos: alto, medio y bajo. La modelación se hizo por factores, en el *factor 1* se identificaron variables relacionadas con la tecnología, acceso a internet, uso de dispositivos móviles, computadora y tv por cable. Personas que estudiaron en instituciones de tipo privado y que tengan profesiones como ingenieros, doctores, comunicadores sociales y otro, dedicados a la ciencia.

Imagen 8. *Análisis por componentes principales-componente en espacio rotado*



Fuente: INEC, 2010, *software* SPSS, Revelo, 2022.

Los sectores que cumplen con estas variables están representados en el Componente 1 y en la Imagen 5 de color verde oscuro, se identifica un grupo social de nivel económico alto, progresivamente cambia la paleta de colores con tendencia al rojo representan los sectores que no cumplen con estas características poblacionales. Como se puede observar este estrato poblacional alto es directamente proporcional con los alojamientos ofertados del servicio de Airbnb en los dos años 2018 y 2022. Esta relación positiva permite identificar que en los sectores donde existe una economía alta hay la oferta del servicio de Airbnb, a través de las TICs (Tecnologías de la Información y la Comunicación).

Sin embargo, existe una diversidad de tonalidades en la paleta de colores que van desde el más alto, representado con verde, hasta el más bajo, representado con rojo. Esta diversidad tal como se representa en el mapa permite visualizar una heterogeneidad territorial en la composición territorial de Quito, compleja y diversa donde convergen en el mismo sector diferentes clases sociales, que no necesariamente comparten entre ellas. Cada predio es una especie de isla urbana cercada por cerramiento, la única proximidad existente es la física mas no la social. Esta forma urbana presenta, entre otras características, una tendencia hacia a la periurbanización y la policentralización donde todo es “difuso, desigual y fragmentado” (De Mattos, 2010). Sin embargo, la proximidad a los servicios y equipamientos juega un rol importante para la densificación de la oferta de un Airbnb, pueda que un predio determinado pertenezca al estrato social más bajo de Quito, pero por su proximidad a los servicios y equipamientos es visto como una oportunidad para la transformación de dicho predio. Esta transformación es más fácil cuando las políticas públicas acompañan las estrategias de los grandes inversionistas. Es decir, avalúos bajos que permite que la oferta de compra y venta sea a un costo mínimo, así como los planes de uso y gestión del suelo, donde se determina parámetros urbanísticos permitidos como retiros, número de pisos, materiales de construcción, entre otros a favor del monopolio de las constructoras, por ejemplo Uribe Schwarzkopf, cuyos diseños y número de pisos modifican el paisaje.

Imagen 9. Edificio de Uribe Schwarzkopf en el sector la Carolina, Quito

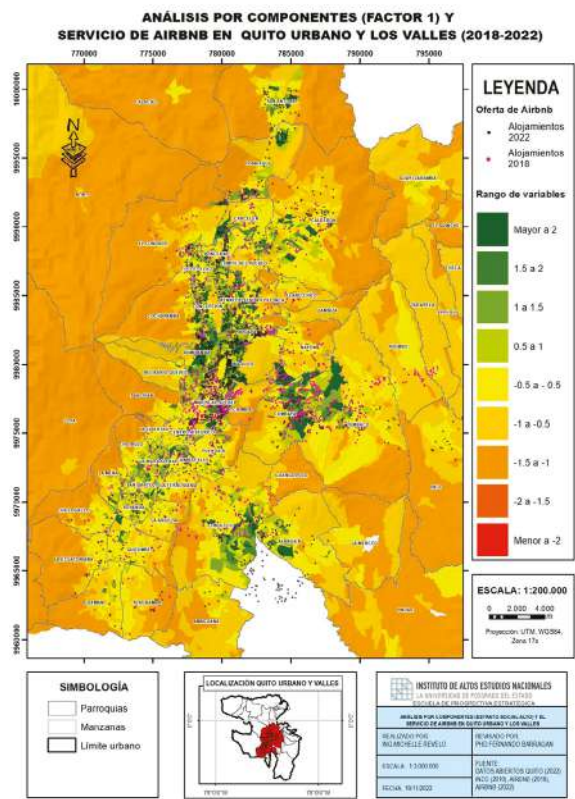


Fuente: Uribe Schwarzkopf, 2024.

La oferta de Airbnb en Quito refleja una notable heterogeneidad tanto en términos sociales como en los elementos físicos que conforman el espacio urbano. Este fenómeno se manifiesta en la diversidad de opciones de alojamiento disponibles, que van desde suites y departamentos hasta haciendas, fincas y casas de campo, ajustándose a diferentes rangos de precios y necesidades de los usuarios. Se identificaron distintas modalidades de alojamiento en función de la ubicación geográfica, las cuales siguen patrones específicos, según el tipo de demanda y la segmentación del mercado.

Una característica destacada en los valles periurbanos de Quito fue la oferta de haciendas y casas de campo con piscina, orientadas principalmente a un turismo de descanso o de tipo vacacional, que aprovecha el entorno

Imagen 10. Estructuras territoriales y servicio de Airbnb 2018-2022

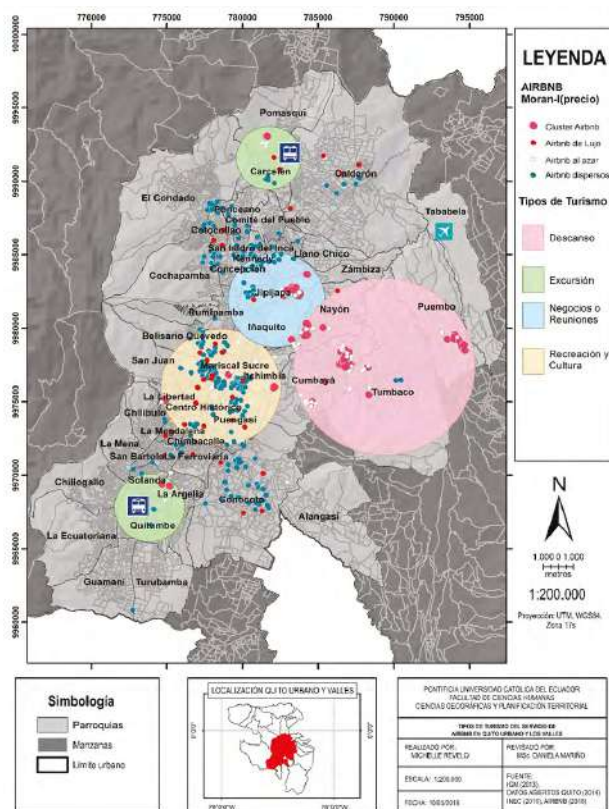


Fuente: Revelo, 2022; Airbnb, 2022. Elaborado por la autora.

natural y la tranquilidad de estos espacios. Este tipo de oferta atrae a turistas que buscan desconectar del ritmo acelerado de la ciudad, favoreciendo la expansión hacia las zonas rurales o periféricas.

Por otro lado, en el sur de la ciudad, la oferta de Airbnb tiene una tendencia a ser significativamente más económica. En estas áreas, la oferta estaba compuesta principalmente por departamentos simples y habitaciones sin mayores características distintivas, lo que respondía a una demanda asociada al turismo de excursión interna, en especial intercantonal, aprovechando la proximidad a los terminales terrestres. Estos alojamientos, más funcionales y de menor costo, estaban dirigidos a viajeros que requerían estancias breves, sin interés por servicios o comodidades adicionales.

Imagen 11. Tipos de turismo en función del servicio de Airbnb



Fuente: Revelo, 2022.

Mientras que en el sector norte de Jipijapa-Iñaquito, ubicado en una zona más céntrica, exhibió una oferta más sofisticada, centrada en departamentos o suites de lujo. Esta segmentación refleja la demanda asociada a turismo de negocios, ya que la zona está estrechamente vinculada a servicios financieros, empresariales y jurídicos, lo que la convierte en un centro neurálgico para profesionales y ejecutivos que visitan la ciudad por motivos laborales y empresariales.

Finalmente, el Centro Histórico de Quito se caracterizó por una oferta de alojamiento más turístico y cultural, casas antiguas restauradas que buscan preservar el patrimonio arquitectónico de la ciudad. Este tipo de alojamiento atrae a turistas interesados en la experiencia cultural y en conocer la historia local, por lo que se ajusta a un segmento de mercado que valora la autenticidad y el legado histórico.

Este análisis espacial se llevó a cabo mediante la clasificación de los alojamientos de Airbnb, asignándoles atributos específicos en la base de datos según su tipo, ubicación y características. Posteriormente, se procedió a zonificar las diferentes ofertas, identificando patrones espaciales de distribución en función de las áreas de la ciudad y los tipos de turismo asociados a cada uno. El análisis reveló que la oferta de Airbnb en Quito no sólo responde a una diversificación de precios, sino también a una segmentación clara en función de las diferentes necesidades turísticas y socioeconómicas de los visitantes, lo que resalta la importancia de considerar la geografía urbana al analizar las dinámicas del turismo en ciudades como Quito.

Como se evidenció en los análisis previos, el análisis espacial permite identificar de manera anticipada los riesgos asociados a la mercantilización del servicio de alojamientos a través de plataformas como Airbnb, así como los puntos de concentración potencial de este fenómeno. Este enfoque proporciona una herramienta valiosa para los tomadores de decisiones, permitiéndoles adoptar medidas proactivas para mitigar los efectos adversos que pueden surgir de una expansión desregulada del servicio, tales como la gentrificación no planificada (Medina y Galván, 2008).

En este contexto, resulta fundamental tener en cuenta diversos criterios al analizar los patrones de distribución de los alojamientos, especialmente en áreas donde la densificación del servicio podría inducir transformaciones

socioeconómicas y espaciales no deseadas. La concentración excesiva de alojamientos turísticos en determinadas zonas puede generar una presión sobre el mercado inmobiliario local, aumentando los precios del suelo y desplazando a las comunidades residentes, creando de este modo guetos de pobreza en las periferias urbanas.

Por ello, es crucial que las políticas urbanas no sólo consideren el impacto económico de la actividad turística, sino también los efectos sociales y urbanos que pueden derivarse de su expansión desmedida. Prever estos impactos mediante el uso de herramientas espaciales permite diseñar estrategias de regulación urbana que promuevan un crecimiento equilibrado y sostenible, evitando la exclusión social y la fragmentación de la ciudad. En este contexto, se llevó a cabo un estudio prospectivo con el objetivo de consultar a expertos urbanistas residentes en la ciudad de Quito sobre las variables que podrían incidir en la gentrificación dentro de la dinámica del servicio de Airbnb (ver tabla 3).

El plano de influencias y dependencias indirectas MIC MAC para categorizar las variables según los términos de Godet (2007) se identificaron diversas agrupaciones: las variables motrices, que representan la zona de poder, son aquellas con alta influencia y baja dependencia, como el uso de la tecnología y la innovación, las cuales condicionan al resto del sistema. Las variables articuladoras, ubicadas en la zona de conflicto, tienen alta influencia y alta dependencia, funcionando como enlaces inestables entre diferentes factores urbanos y abarcan fenómenos como la centralidad, la urbanización acelerada, la turistificación, y la especulación de precios de renta, entre otros. Las variables exógenas, en la Zona de Variables Autónomas, tienen baja influencia y baja dependencia e incluyen factores como la expropiación y el desempleo.

Finalmente, las variables resultado o salida, representadas en la zona de salida, muestran baja influencia, pero alta dependencia y su evolución está determinada por las variables motrices y articuladoras; entre ellas se encuentran el fraccionamiento urbano, el abandono y desinversión, y la heterogeneidad territorial. Este enfoque permite comprender cómo las distintas variables influyen y se interrelacionan en la dinámica urbana, especialmente en el contexto de la gentrificación y el desarrollo urbano en Quito.

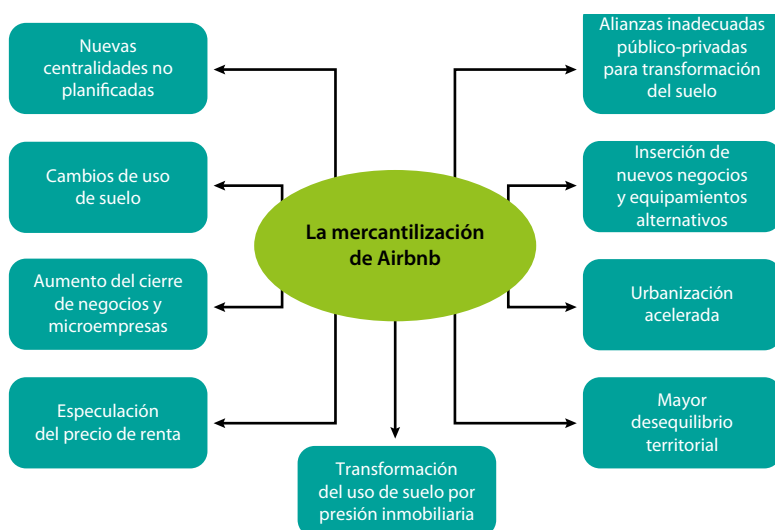
El análisis de los procesos urbanos actuales revela una serie de fenómenos interconectados que reflejan la complejidad de la transformación urba-

Tabla 3. Matriz MIC MAC con los resultados cuantitativos a la valoración de la importancia realizada por los expertos de las variables estudiadas (criterio por experto)

	Emigración	Mercantilización del suelo	Especulación precio de renta	Desempleo	Expropiación	Abandono y desinversión	Turistificación	Cierre de negocios y microempresas	Insertión de nuevos negocios	Fraccionamiento	Transformación del uso de suelo por presión inmobiliaria	Cambio de uso de suelo	Heterogeneidad territorial	Proximidad a servicios y empleos	Uso de la tecnología y la innovación	Centralidades	Urbanización acelerada	Alianzas público-privadas	Cambios de uso de suelo en contra de las herramientas de planificación	
Emigración	0	3	3	3	0	2	2	3	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	20
Mercantilización del suelo	1	0	3	1	2	3	1	2	2	2	2	2	1	2	0	1	1	3	2	31
Especulación precio de renta	0	3	0	0	3	1	1	2	2	3	3	3	1	3	1	1	1	3	2	33
Desempleo	3	0	0	0	0	3	2	3	2	2	1	2	1	2	1	0	0	1	1	24
Expropiación	3	2	2	1	0	1	0	1	0	1	3	2	2	2	0	1	2	3	2	28
Abandono y desinversión	2	2	2	2	0	0	2	2	0	3	2	2	1	0	0	0	0	2	2	24
Turistificación	2	3	3	2	0	2	0	2	3	2	2	3	3	2	2	2	2	3	2	40
Cierre de negocios y microempresas	2	2	2	2	0	3	3	0	2	2	3	2	1	0	0	1	1	2	2	30
Insertión de nuevos negocios	2	3	3	1	0	2	2	2	0	3	3	3	2	2	3	3	2	2	2	40
Fraccionamiento	2	2	3	2	1	1	1	1	1	0	2	2	2	1	0	0	1	2	3	27
Transformación del uso de suelo por presión inmobiliaria	1	3	3	1	2	3	1	2	3	3	0	2	1	2	0	2	2	2	2	35
Cambio de uso de suelo	1	2	2	0	2	1	2	0	0	3	3	0	3	2	0	3	3	2	3	32
Heterogeneidad territorial	0	0	0	0	0	0	1	0	2	2	2	0	0	3	0	1	1	2	1	15
Proximidad a servicios y empleos	2	3	3	2	2	1	3	1	3	1	1	2	2	0	1	3	3	3	2	38
Uso de la tecnología y la innovación	2	2	3	1	1	2	3	3	3	1	2	2	0	3	0	2	3	2	2	37
Centralidades	2	2	2	0	0	2	3	2	3	2	2	3	1	3	1	0	2	3	2	35
Urbanización acelerada	2	3	3	2	2	1	3	1	2	2	3	3	2	2	1	3	0	3	3	41
Alianzas público-privadas	2	3	2	2	3	2	2	2	2	3	3	3	2	3	0	3	3	0	2	42
Cambios de uso de suelo en contra de las herramientas de planificación	2	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	3	2	0	2	3	2	0	40
	31	41	42	24	20	33	34	31	33	37	40	41	28	34	10	28	30	40	35	
DEPENDENCIA																				

na en contextos de gentrificación y turistificación. En primer lugar, el surgimiento de nuevas centralidades no planificadas es un claro indicio de descentralización urbana, impulsada tanto por la saturación de las centralidades tradicionales como por la falta de planificación integral, lo cual permite un crecimiento espontáneo sin una visión estratégica. Este fenómeno conlleva implicaciones como la fragmentación del tejido urbano y desafíos en la provisión de infraestructura y transporte.

Imagen 12. Escenario que promueve la mercantilización del servicio de Airbnb



Fuente: elaboración propia.

A su vez, las alianzas público-privadas inadecuadas priorizan intereses económicos sobre el bienestar social, exacerbando la desigualdad y la exclusión social y reduciendo el control público sobre el desarrollo urbano. Los cambios de uso de suelo, por su parte, están orientados hacia usos más rentables, como la conversión de viviendas en alojamientos turísticos, lo cual conlleva a la pérdida de diversidad funcional y genera desplazamientos socioeconómicos. En este contexto, la mercantilización del espacio, especialmente a través de plataformas como Airbnb, intensifica los procesos de gentrificación, aumentando la especulación inmobiliaria y afectando la accesibilidad de la vivienda para los residentes locales. La inserción de nuevos

negocios y equipamientos orientados a un público de mayor poder adquisitivo contribuye a la exclusión de los residentes tradicionales, al mismo tiempo que se observa un aumento en el cierre de negocios y microempresas locales debido a los altos costos operativos y la competencia desleal. La urbanización acelerada, particularmente en las periferias, evidencia una expansión descontrolada, generando un desequilibrio territorial con áreas centrales saturadas y periferias subdesarrolladas. Este desequilibrio también se ve reflejado en la especulación del precio de la renta, lo que agrava la desigualdad social y territorial, desplazando a las poblaciones vulnerables y afectando la cohesión social. En conjunto, estos procesos reflejan los efectos negativos de la gentrificación y la turistificación sobre la estructura social, económica y territorial de las ciudades, lo que subraya la necesidad urgente de políticas públicas que fomenten un desarrollo urbano inclusivo, sostenible y equitativo, que prioricen el bienestar de las poblaciones locales y la preservación del patrimonio cultural.

Conclusiones

La gentrificación trasciende el ámbito de la transformación urbana, convirtiéndose en un fenómeno político internacional que avanza en las principales ciudades del mundo. Este proceso está impulsado por políticas neoliberales, la exclusión socioeconómica, la mercantilización del suelo y las alianzas público-privadas. Estos factores han dado lugar a un cambio profundo en la estructura de las ciudades, afectando tanto su dinámica social como económica.

La plataforma Airbnb y la transformación del territorio: durante el análisis espacial de patrones territoriales, se ha identificado que la aparición de servicios como Airbnb, aunque aleatoria en su origen, tiende a concentrarse en áreas con mayores recursos, como las que cuentan con buena infraestructura, tecnología y acceso a servicios. Si bien no es una condición necesaria, los inversionistas aprovechan las áreas de bajo costo para restaurar propiedades o desarrollar grandes edificaciones de lujo, elevando los precios del suelo y rentas significativamente.

Efectos socioeconómicos y culturales de Airbnb en Quito: el crecimiento de Airbnb ha generado cambios notables en la estructura socioeconómica de algunos barrios de Quito, configurando un entorno urbano más heterogéneo. Aunque Airbnb no es el único factor que impulsa la gentrificación, se ha mostrado como una herramienta fundamental para la transformación del uso del suelo y la evasión fiscal. Este fenómeno ha contribuido a la mercantilización del patrimonio y la cultura, convirtiéndolos en activos al servicio de la construcción de una “marca de ciudad” y el fortalecimiento de la plataforma a nivel urbano.

Desafíos para la planificación urbana: con el crecimiento de la oferta de Airbnb, surgen desafíos importantes para la planificación y el ordenamiento territorial, que podrían tener consecuencias disruptivas en la ciudad. La integración de estos servicios en la estructura urbana puede generar tensiones y desequilibrios, lo que requiere una respuesta coordinada entre el gobierno, las empresas privadas y la sociedad civil para mitigar los efectos negativos en el tejido urbano y social.

Evasión regulatoria y monetización del acto de compartir: los inversionistas, que inicialmente fueron atraídos por la idealización del acto de compartir a través de plataformas como Airbnb, han logrado evadir regulaciones, impuestos y rendición de cuentas, transformando un valor social en una oportunidad para la obtención de ganancias. Este fenómeno ha contribuido a la turistificación de las áreas urbanas, incrementando la desigualdad social y económica y exacerbando las tensiones territoriales derivadas de la gentrificación.

Necesidad de políticas públicas para mitigar los efectos de la gentrificación: es fundamental implementar políticas públicas que promuevan un desarrollo urbano inclusivo, sostenible y equitativo. Conociendo los efectos de la gentrificación y la turistificación, es necesario que el gobierno, las organizaciones y la sociedad trabajen en conjunto para prevenir y mitigar los problemas socioeconómicos y urbanos resultantes de la mercantilización del espacio, con especial atención a la preservación del patrimonio cultural y la equidad social.

El análisis espacial y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas clave para comprender y abordar los fenómenos urbanos complejos, mismos que permiten identificar patrones, analizar las dinámicas sociales y económicas para posteriormente realizar acciones de mitigación, conforme a las necesidades y contextos locales.

Referencias

- Airbnb. (2022). Airbnb. Obtenido de https://es.AIRBNB.com/a/?af=43720035&c=.pi0.pk16593168622_259994555952_c_12026464216&sem_position=1t1&sem_target=kwd12026464216&location_of_interest=&location_physical=9069516&ghost=true&gclid=Cj0KCQIAh9njBRCYARIsALJhQkGm4t6P1ODXACFmNkAleNQAZX3Sy-JZtmEr
- AirDNA. (2017). Lima, Perú. Recuperado el 2017, de Análisis Airbnb en Lima, Perú: <https://www.airdna.co/city/pe/lima>
- Berry, J. K. (1996). The Unique Character of Spatial Analysis. *GIS World*. April: 29-30
- Buzai, (2015). Análisis socio-espacial con Sistemas de Información Geográfica, marco conceptual basado en la teoría de la geografía. Universidad Nacional de Luján. Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG), Argentina.
- Cañas-Barrigas, T. L. (2018). Turismo p2p, un diagnóstico multidimensional desde la oferta de viviendas de uso turístico en la ciudad de Quito. Tesis de licenciatura. Repositorio Nacional. <https://repositorio.puce.edu.ec/items/073ec97c-a77d-4100-93-21-ac8691a96079>
- Cevallos-Aráuz, A. (2018). Efectos no esperados del proceso de gentrificación. Barrio La Floresta (Quito). *Bitácora Urbano Territorial*, 28(2), 25-33.
- Checa-Artasu, M. (2011). Gentrificación y cultura: algunas reflexiones. *Biblio 3W Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, 16(914), 1-37.
- Chesky, B. (2020). A message from co-founder and CEO Brian Chesky. <https://news.airbnb.com/a-message-from-co-founder-and-ceo-brian-chesky/>
- De Mattos, C. A. (2010). Globalización y metamorfosis metropolitana en América Latina: de la ciudad a lo urbano generalizado. *Revista de Geografía Norte Grande*, (47), 81-104.
- Deutsche, R., & Ryan, C. G. (2015). El bello arte de la gentrificación. In *El mercado contra la ciudad: sobre globalización, gentrificación y políticas urbanas* (pp. 27-52). Traficantes de Sueños.
- Distrito Metropolitano de Quito (2024). Geotecnologías y planificación territorial: innovando el desarrollo urbano en Quito con gemelos digitales. Evento Esri. CUE2024.
- Durán, G., Costa, M. M., & Mérida, J. (2016). Crecimiento, segregación y mecanismos de desplazamiento en el periurbano de Quito. *Íconos: Revista de Ciencias Sociales*, (56), 123-146.
- EjePrime. (2024). Airbnb logra beneficios de récord y apunta a nuevos modelos de negocio. <https://www.ejeprime.com/empresa/airbnb-logra-beneficios-de-record-y-apunta-a-nuevos-modelos-de-negocio>
- Escobar, A. (2004). Desplazamientos, desarrollo y modernidad en el Pacífico colombiano. Conflicto e (in) visibilidad. *Desplazamientos, desarrollo y modernidad en el Pacífico colombiano*, 1, 53-72.
- Freytag, T., & Bauder, M. (2018). Bottom-up touristification and urban transformations in Paris. *Tourism Geographies*, 20(3), 443-460.

- Guttentag. (2018). Qué impacto tiene en las ciudades Airbnb, la controvertida plataforma de alquiler temporal para turistas. *BBC News Mundo*.
- Harvey J. Miller & Elizabeth A. Wentz (2003). Representation and Spatial Analysis in Geographic Information Systems, *Annals of the Association of American Geographers*, 93:3, 574-594, DOI: 10.1111/1467-8306.9303004
- Harvey J. Miller (2004). Tobler's First Law and Spatial Analysis, *Annals of the Association of American Geographers*, 94:2, 284-289, DOI:10.1111/j.14678306.2004.09402005.x
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). México D. F., México: Mcgraw-hill. Recuperado el 10 de enero de 2022, de <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Hidalgo, R., & Janoschka, M. (Eds.). (2014). *La ciudad neoliberal: gentrificación y exclusión en Santiago de Chile, Buenos Aires, Ciudad de México y Madrid*. Rodrigo Hidalgo y Michael Janoschka.
- INEC (2010). Base de Datos-Censo de Población y Vivienda 2010. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/base-de-datos-censo-de-poblacion-y-vivienda-2010/>
- Janoschka, M., Sequera, J., & Salinas, L. (2014). Gentrificación en España y América Latina: un diálogo crítico. *Revista de Geografía Norte Grande*, (58), 7-40.
- López-Morales, E. (2013). Gentrificación en Chile: aportes conceptuales y evidencias para una discusión necesaria. *Revista de Geografía Norte Grande*, (56), 31-52.
- Marulanda Hernández, A., & Martí, M. (2019). Desafiando la gentrificación. Resistencias a los desplazamientos en los centros históricos de Quito y Cuenca. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 23.
- Medina Vásquez, J. E., Becerra, S., & Castaño, P. (2014). *Prospectiva y política pública para el cambio estructural en América Latina y el Caribe*. Chile. CEPAL.
- Medina, F., & Galván, M. (2008). *Descomposición del coeficiente de Gini por fuentes de ingreso: Evidencia empírica para América Latina 1999-2005*. Chile, CEPAL.
- MINTUR (2015). Reglamento de alojamiento turístico. <https://www.turismo.gob.ec/wp-content/uploads/2016/04/REGLAMENTO-DE-ALOJAMIENTO-TURISTICO.pdf>
- Pacione, M. (1990). Urban liveability: a review. *Urban geography*, 11(1), 1-30.
- Pillet (2004). La geografía y las distintas acepciones del espacio geográfico. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Castilla
- Revelo, M. M. (2022). Patrones territoriales del servicio de alojamiento con la plataforma Airbnb en Quito urbano y la conurbación de Los Valles, para el año 2018. *Investigaciones Geográficas*, (64), 38-53.
- Rosero, S. (2018). El nuevo ambiente de la vieja Tola. *Mundo Dinero*.
- Silva, A. (2008). La globalización cultural y las Tecnologías de Información Comunicación en la cibernética. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1995/19952072-7016.pdf>
- Smith, N., & Williams, P. (Eds.). (1986). *Gentrification of the City* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/978131588909>

- Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*. 46: 234–40.
- Verdú, D. (2015). El 'efecto Airbnb' en el vecindario. El País. Obtenido de https://elpais.com/economia/2015/12/10/actualidad/1449738303_311413.html

6. Accesibilidad potencial a equipamientos de salud y educación para el ejercicio de derechos en las comunidades del polígono de impacto del Proyecto Ecológico para el Lago de Texcoco (PELT), 2020

KARLA TERESA ROJAS MORENO*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.279.06>

Resumen

La forma en que se hace la distribución territorial de bienes asociados a la salud y la educación es un componente fundamental de la diferenciación socioespacial. La zona del denominado Proyecto Ecológico para el lago de Texcoco (PELT) ha resultado controversial en los últimos años, debido a los procesos de expansión territorial fomentados por el megaproyecto del nuevo aeropuerto de la Ciudad de México que, si bien no se llevó a cabo, tuvo impactos económicos, sociales y ambientales. El objetivo de la presente investigación es diagnosticar la accesibilidad a equipamientos de salud y educación, para una población desigual, fragmentada y que requiere mejorar sus condiciones de bienestar de manera retributiva a la preservación de su territorio. Para ello se realiza el cálculo de isócronas con el *software* QGIS 3.32.2 y su complemento HQGIS en trayectos inferiores a 15 minutos desde los centros de salud públicos y privados; asimismo, para el caso de escuelas de nivel básico y medio superior público, se realiza una estimación de la probabilidad de acceso de acuerdo con el número de ocupados con el uso del método 2SFCA (cobertura flotante de dos pasos); la información que se usa como insumo para la oferta proviene bases de datos oficiales de la Ciudad de México y el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas, 2022. Se asume que una mejor distribución territorial de los bienes de salud contribuye a

* Doctora en Urbanismo. Profesora-investigadora de El Colegio Mexiquense A. C., México, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0916-4429>; correo: karlita.dua@gmail.com

garantizar el derecho a mantenerse sano y, con ello, preservar la capacidad de cuidado de los recursos naturales de la zona del PELT, mientras que la educación contribuye a mejorar el sentido de identidad e interacción con personas iguales, con lo cual se promuevan valores de preservación, se mejora la toma de decisiones en el mediano plazo y se reducen los gastos que los habitantes deban ejercer para validar este derecho en las generaciones más jóvenes.

Palabras clave: *accesibilidad potencial, salud, educación, PELT.*

Introducción

Disparidades socioterritoriales en el polígono del Proyecto Ecológico para el Lago de Texcoco (PELT)

La inserción de México, desde los 90, en el circuito económico global incrementó el movimiento de personas y mercancías por vía aérea. Sin embargo la infraestructura (pistas de aterrizaje, terminales y accesos) del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México Benito Juárez (AICM) resultó insuficiente para cubrir la demanda creciente (Moreno-Sánchez, 2018). De acuerdo con (Torres & Chías, 2013) el impacto territorial que alcanzaba el servicio del AICM incluía las alcaldías de Miguel Hidalgo, Venustiano Carranza, Benito Juárez, Cuauhtémoc y Azcapotzalco, así como los municipios de Naucalpan, Tlalnepantla de Baz, Ecatepec y Melchor Ocampo, donde en marzo de 2011 se albergaron 1 441 unidades económicas relacionadas con el transporte aéreo regular, servicios de navegación aérea, administración de aeropuertos y helipuertos, así como autobuses foráneos. Es decir, que a pesar de la extensión en el impacto territorial, éste se mantenía como insuficiente, ya que no se realizaban sólo vuelos comerciales, sino también de traslado de mercancías.

Con el fin de ampliar la capacidad del servicio aéreo, en 2001 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación 19 decretos de expropiación de tierras, al noreste de la Ciudad de México y aproximadamente a 14 kilómetros al este del AICM, en 13 núcleos ejidales de Texcoco, Chimalhuacán y Atenco, Estado de México (Galeana, 2022; Moreno Sánchez *et al.*, 2018).

En estos terrenos se instalaría estratégicamente el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM), debido a que la normativa, justificada en potenciar el desarrollo económico del país y la región, contribuía a la desincorporación y cambio de uso de suelo de tierras ejidales y comunales, en beneficio del orden estatal.

Sin embargo, el 1 de agosto de 2002 se anunció la derogación del decreto expropiatorio y la cancelación del proyecto, debido a la resistencia de la comunidad apoyada por el Frente de Pueblos en Defensa de la Tierra (FPDT), quienes sustentaron sus argumentos en las potencialidades ecológicas de la zona y los riesgos existentes en la construcción del NAICM (Galeana, 2022).

En la zona existen procesos del ciclo hídrico que mantienen el equilibrio ambiental y la sustentabilidad de la región, como la precipitación, la evapotranspiración, el escurrimiento artificial y natural, así como la recarga de los acuíferos (Galeana, 2022; Moreno-Sánchez, 2018).

Con base en lo anteriormente expuesto, entre 2009 y 2011 el Gobierno Federal a través de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), adquirió parcelas y terrenos ejidales, en mayor medida del municipio de Atenco para ampliar la zona federal del Lago de Texcoco mediante un proyecto ecológico. No obstante, de acuerdo con Galeana (2022) y Soto Coloballes (2023) la compra se dio mediante asambleas ilegales, en las que se incluyó el cambio en el uso de suelo, a dominio pleno.

Para 2015, en la administración del expresidente Enrique Peña Nieto se inició la construcción del megaproyecto NAICM, que consideraba una superficie de 4 430 hectáreas (ha), en la zona federal del Lago de Texcoco (ZFLT) con una extensión de 12 363.0 ha, asimismo, el Grupo Aeroportuario, órgano responsable del NAICM, reportó que tan sólo en la etapa de construcción se estimaba emplear a 160 mil personas (Moreno Sánchez *et al.*, 2018).

En este sentido, la región no contaba con infraestructura suficiente para albergar el crecimiento de población, servicios y bienes ya que, además se presentaban profundas disparidades en infraestructura, ingreso familiar, servicios sociales, grados de escolaridad y calificación laboral.

De acuerdo con datos del rezago social a nivel de zonas urbanas (AGEB Urbanas, 2015) del CONEVAL (2015) el porcentaje de personas bajo situación de pobreza era más alto en los municipios de Tezoyuca, con 65.4% de su

población; Chimalhuacán, con 61.5% y Atenco, con 59.3%. Asimismo, el municipio de Tezoyuca presentaba en promedio 2.4 carencias, mientras que Texcoco y Acolman presentaron 2.0 carencias en promedio.

En promedio, la proporción de personas que presentaban carencia por acceso a la salud en la zona del PELT fue de 20.75%, en la que destacaban los municipios de Tezoyuca, Chimalhuacán y Ecatepec. En cuanto al rezago educativo 10.87% de los habitantes de la zona presentaron esta característica, con mayor intensidad en los municipios de Chimalhuacán, Tezoyuca y Atenco.

Fue así como, ante las presiones ambientales, sociales y económicas que se vivieron en los municipios alrededor de la obra del NAICM, aumentó el conflicto social por el territorio, ya que parte de los habitantes se mantenían en negativa a la obra.

Para diciembre de 2018, durante la gestión del presidente Andrés Manuel López Obrador, se llevó a cabo la consulta ciudadana respecto a la continuación de la construcción del NAICM. Los resultados publicados arrojaron que 70% de poco más de un millón de votantes optaron por cancelar el megaproyecto (Galeana, 2022; Moreno Sánchez *et al.*, 2018; Moreno-Sánchez, 2018).

A pesar de la cancelación del proyecto, los impactos derivados de la disputa territorial e inicio de la obra que se llevaron por años, requieren revalorizar el polígono del PELT, no sólo desde su perspectiva ambiental, sino también desde las necesidades sociales territorializadas que se evidenciaron y que formaron parte de la moneda de cambio de los terrenos.

La vulnerabilidad de los territorios agrícolas realza la necesidad de atender como temas prioritarios sus derechos humanos a la salud y a la educación, como derechos colectivos sistemáticamente articulados. Esto se ha señalado en los decenios internacionales de las poblaciones del mundo 1995-2004 y 2005-2015; así como en los Objetivos del Desarrollo Sostenible 3 salud y 4 educación; así como en el Acuerdo de París (Conde, 2022).

Dicho lo anterior, la zona de estudio considerada en esta investigación es Venustiano Carranza, Gustavo A. Madero, Ecatepec, Acolman, Tezoyuca, Atenco, Texcoco, Chimalhuacán y Nezahualcóyotl.

La investigación desarrollada en este trabajo tiene como objetivo diagnosticar la accesibilidad a equipamientos de salud y educación, con enfoque

multiescalar, para una población que requiere mejorar sus condiciones de bienestar de manera retributiva a la preservación de su territorio.

Por lo que responde a las preguntas: ¿Cuál es la oferta y demanda existente de equipamiento por tipo de municipio en el área colindante al Proyecto Ecológico del Lago de Texcoco?, ¿Cuáles son las zonas de menor accesibilidad y ejercicio de derecho a la salud en el área colindante al Proyecto Ecológico del Lago de Texcoco?, ¿Cuál es el nivel de accesibilidad geográfica de la población de Atenco, Tezoyuca y Acolman a los distintos equipamientos que ofrecen educación?

A estos cuestionamientos se da respuesta en cuatro apartados; en el primero se abordan los equipamientos como una forma de bienestar territorial; en el segundo se explican los métodos aplicados: densidad de Kernel y 2SFCA (Cobertura Flotante de dos pasos); en el tercero se seccionan los resultados para los equipamientos de salud y posteriormente se abordan los de educación; en el cuarto apartado se develan las desventajas en el acceso a equipamiento de salud y educación de los municipios de Atenco, Tezoyuca y Acolman, así como los nichos de oportunidad a atender; finalmente se presentan unas breves conclusiones de la investigación.

Accesibilidad potencial a equipamientos como medio de distribución espacial de recursos

Conocer la disponibilidad de recursos en el territorio, es fundamental para garantizar los derechos de las personas y dimensionar las necesidades de la población desde una perspectiva espacial. La zona del Proyecto Ecológico del Lago de Texcoco representa un doble desafío: preservar el equilibrio ambiental y asegurar el acceso a derechos humanos básicos para sus habitantes. Estos últimos desempeñan un papel crucial al proteger los servicios ambientales que benefician a la zona metropolitana más grande del país, sin que ello implique un consumo adicional de suelo. Los equipamientos colectivos desde la economía urbana se entienden como activos fijos distribuidos de manera indivisible en el territorio, a través de edificaciones y espacios, predominantemente de uso público, en los que se proporcionan servicios de bienestar social y apoyo a las actividades económicas, para

posibilitar el acceso a derechos (Ghysais Chadid, 2018; Rojas Moreno, 2019; Mayorga-Henao, 2019), bienestar de las personas, la calidad de vida y el desarrollo humano (Cáceres & Ahumada, 2020; Cáceres-Seguel, 2016; Harvey, 2003).

Desde una perspectiva sociológica los equipamientos son lugares (Massey, 2005) productores de capital social, sentimientos de pertenencia, identidad y acumulación de activos (Kaztman, 2001), debido a que en ellos tiene lugar el encuentro de actividades e interacciones sociales, así como flujos de información que dan significado, representatividad y referencia (Ghysais Chadid, 2018).

De manera que, la localización de los equipamientos en puntos concretos de la ciudad determina las posibilidades de acceso espacial a éstos, contribuyendo a la diferenciación social e inequidad de un individuo o un grupo.

La concentración de grupos con bajos ingresos en determinadas áreas de las ciudades agrava su situación, al generarse dinámicas de segregación territorial (Pitarch-Garrido *et al.*, 2018a). Para la población en estado de pobreza, la existencia de equipamientos les permite interactuar con otros estratos, conocer sus estilos de vida y enfocarse en modelos de rol que brinden metas personales mayores, más allá de la solución a los problemas de la vida cotidiana (Mayorga-Henao, 2019); asimismo, se asume que los grupos con menores ingresos pasan más tiempo en sus barrios que los grupos con mayores ingresos.

De acuerdo con Cáceres-Seguel (2016) y Rojas (2021) las áreas urbanas con déficit de equipamiento impactan, principalmente, a los grupos vulnerables, dado el costo que supone un mayor desplazamiento diario, mientras que para las personas con menor potencial de movilidad (personas en situación de discapacidad, niños, adultos mayores) se convierten en una condición para su desarrollo y bienestar.

Dicho lo anterior, el concepto de accesibilidad se usa para comprender el impacto del transporte sobre la exclusión social y las desigualdades espaciales (Montes Galbán *et al.*, 2020). Al respecto, se pueden considerar dos tipos de accesibilidad, por un lado, la accesibilidad potencial y por otro la accesibilidad real; la primera hace referencia a la relación compleja de oportunidades (o probabilidades) de contacto e interacción entre la distribución

de la población y la cobertura de un bien público; por su parte, la accesibilidad real se refiere a la utilización efectiva del servicio (Garnica, 2012; Pitarch-Garrido *et al.*, 2018a).

En este sentido, para dimensionar la accesibilidad potencial, la distancia al equipamiento urbano concentra la atención de investigadores y programas públicos que buscan resolver el estándar de distancia, medida en tiempo, a la cuál debería estar cada tipo de equipamiento (deportivo, educativo, cultural, comercial y de salud) con respecto a la vivienda.

Los indicadores que usualmente se han tomado en cuenta para medir la eficiencia espacial en la accesibilidad son el costo de viaje, la distancia y el tiempo (Bosque Sendra, Joaquín; Moreno Jiménez, 2012; Galindo Pérez y Suárez Lastra, 2018; Garrocho, Carlos; Chávez-Soto, Tania; Álvarez-Lobato, 2020; Mardones, N.; Valdivia, J. y Aseguinolaza, 2020; Pitchard *et al.*, 2018).

Es así como, para Ewing y Handy (2009), equipamientos como la plaza, el colegio y las paradas de transporte público deberían estar en distancias inferiores a 400 metros. Otras propuestas señalan que las áreas residenciales deben ser diversas socialmente, de extensión no mayor a 800 o 1 000 metros, caminables, con oferta de vivienda accesible socialmente, conectadas a redes de transporte y nuevas tecnologías, con servicios sociales, comercio de baja escala, espacios públicos y equipamiento recreativos y culturales (Avineri *et al.*, 2012; Pitarch-Garrido *et al.*, 2018a).

En el caso particular de los servicios de una mayor economía de escala como son los de salud Rojas, *et al.* (2022) sugiere una distancia máxima de marcha cómoda de 945 metros.

Por ejemplo, una clínica o una primaria que requieren cubrir un demanda mayor e inmediata pueden estar a distancias menores desde los hogares, mientras que un hospital con especialidades o una universidad deberán tener un rango más amplio de demanda (Bosque Sendra, Joaquín; Moreno Jiménez, 2012; Lozano, 1996).

El equipamiento barrial constituye centros de vida cotidiana y con ello puede impactar en conductas y hábitos cotidianos favorables para la salud física y mental, actuar en aspectos simbólicos como cohesión social o percepción de seguridad, promover la movilidad sostenible, así como acercar a los residentes a mecanismos de protección social (Dovey y Pafka, 2020; Guimpert y Hurtubia, 2018).

Acceso a servicios de salud y educación, como medios para potenciar el desarrollo humano

Accesibilidad a la salud

El ingreso, la educación y la salud son determinantes para alcanzar una adecuada calidad de vida en la metrópoli y la megalópolis más importantes del país. Los sistemas de salud son un medio para establecer contacto entre la población y la atención médica. Los servicios de atención médica están destinados a la prevención, curación y rehabilitación de manera incluyente, equitativa y con calidad. Por su parte, los servicios de salud pública tienen como finalidad la prevención y control de enfermedades transmisibles, no transmisibles y de los accidentes; a través de la vigilancia e investigación epidemiológica y la educación para la salud (Galindo, 2016:19-25), en las unidades de atención médica se busca cubrir ambos. Desde una perspectiva comunitaria, la existencia de unidades de atención médica contribuye a la vigilancia territorial de enfermedades infectocontagiosas, así como a la prevención de problemas como la desnutrición e incluso la planificación familiar, de manera que al controlar las condiciones de salud en áreas de conservación se promueve la supervivencia de quienes las habitan y cuidan (Conant y Fadem, 2011).

Es así como en los equipamientos donde se presta atención médica se validan los derechos individuales y, por otra parte, se contribuye a la prevención de contagios, derivados de la proximidad de unidades territoriales, ya que cuando una considerable proporción de la población se ve afectada por la enfermedad, se vulnera al resto, a través de infecciones y enfermedades (Curtis, 2003).

En el contexto territorial, el análisis de su provisión se puede realizar mediante el estudio de patrones espaciales de ubicación, cantidad y características que proporcionan a los habitantes unas oportunidades desiguales de uso y disfrute de los mismos (Hare y Barcus, 2007; Moreno, 2008).

En un primer momento, la disponibilidad y accesibilidad, se logran mediante el desplazamiento al centro de salud, que en ocasiones puede resultar difícil o demasiado costoso (Hoskins *et al.*, 2005). Por su parte, la cobertura de servicios de salud se entiende como el grado de influencia y la capacidad de respuesta social y territorial de los servicios, según su distribución.

La accesibilidad a servicios de salud se vuelve vital, en especial para las personas que viven en la periferia de la ciudad bajo condiciones de ausencia o baja calidad en el transporte y que, en condiciones de emergencia requieren hacer eficientes sus desplazamientos en el menor tiempo posible (Cortés, 2021).

Además, también en la periferia es donde se presenta una mayor cantidad de enfermedades relacionadas con la pobreza, como la desnutrición, las infecciones intestinales, la tuberculosis, la mortalidad infantil, la materno-infantil y el VIH, las cuales suelen converger con los indicadores de bajo grado de escolaridad e ingresos, así como con no contar con derechohabencia (Juárez, M., y Velasco, 2017).

Por lo tanto, es imperativo implementar políticas públicas que integren la salud comunitaria de las periferias con la gestión sostenible de los recursos naturales, ya que sólo así se podrá romper el ciclo de pobreza y enfermedad que afecta a las zonas más vulnerables, al tiempo que se fortalece la capacidad de estas comunidades para seguir protegiendo los ecosistemas que son vitales para el equilibrio ambiental y el bienestar de toda la sociedad.

Accesibilidad a la educación

La educación, como derecho humano básico, es una herramienta clave para fomentar la conciencia ambiental y promover prácticas sostenibles en el manejo de los recursos naturales. Por su parte, el cuidado de estos recursos es esencial para garantizar la supervivencia de las comunidades, la preservación de los ecosistemas y la mitigación de los impactos del cambio climático.

La accesibilidad a equipamientos colectivos de educación contribuye a fortalecer el capital social en los siguientes aspectos: por un lado, la participación de los estudiantes en condiciones de igualdad y uniformidad en grupos heterogéneos en las instituciones educativas que les provee de identidades, metas, derechos y obligaciones comunes, así como de actitudes positivas de reconocimiento del otro como sujeto de derechos que se extienden a compañeros de distinto origen social (Katzman, 2001, p. 177; Talen, 2001; Xu *et al.*, 2018; y Katzman, 2001). Por el contrario, la distribución no uniforme de accesibilidad a las oportunidades educativas puede

agudizar las inequidades sociales, ya que incluso influye en la deserción escolar (Montes Galbán *et al.*, 2020; Talen, 2001).

El acceso a los servicios educativos se puede dividir en cuatro aspectos: 1) accesibilidad potencial, relacionada con el tiempo de impedancia entre el servicio y el usuario, 2) asequibilidad, la cual se relaciona con el costo, 3) aceptabilidad, asociada con la calidad y satisfacción del servicio, 4) apropiación, características de la necesidad del usuario (Xu *et al.*, 2018).

La estimación de la accesibilidad potencial es vital en territorios donde habitan las familias de bajos ingresos, ya que una mayor distancia a las escuelas públicas de educación básica incrementa el retraso para cursar el nivel educativo, debido a los costos de desplazamiento a la escuela, que reducen el rango de elección institucional y el acceso a oportunidades (Sharma y Patil, 2022). Asimismo, durante los periodos de recesión económica, las personas reducen sus gastos y, entre ellos el de transporte, incluido el público, lo cual significa que aumentan los desplazamientos a pie (Pitarch-Garrido *et al.*, 2018a).

Para el caso de la educación primaria una localización cercana reduce los impactos derivados de los horarios de entrada, el agotamiento físico y los problemas de salud, debido entre otras causas al peso de los útiles escolares, desplazados durante largas distancias (Sharma y Patil, 2022).

En la escala barrial las escuelas representan el significado de la enseñanza y predeterminan los cuerpos del conocimiento, entre éstos se incluyen los asociados a la identidad local y las tradiciones, lo que contribuye a generar también lazos de colaboración (Talen, 2001). Otra ventaja de una adecuada localización de las escuelas es la conformación de una red colaborativa entre instituciones, que permite la coordinación entre éstas (Xu *et al.*, 2018).

Autores como Xu *et al.* (2018) han identificado que, a medida que se comienza a atender el rezago educativo mediante nuevas escuelas en la periferia, es probable que se logre un mayor acceso con respecto a las zonas centrales. Adicionalmente, en el estudio de Talen (2001) se ha confirmado que las escuelas más pequeñas tienen efectos positivos en la educación de estudiantes empobrecidos, este fenómeno se debe en parte a que estas escuelas tienen una mayor vinculación con los niveles de participación en actividades extracurriculares, que para el caso de la zona de estudio podrían estar vinculadas con el cuidado y preservación de sus riquezas naturales.

Método

Para el desarrollo de la investigación, en un primer momento se llevó a cabo una consulta documental de investigaciones previas que abordan el derecho de acceso a la salud y educación en las comunidades con recursos naturales. Posteriormente, con base en la información disponible derivada del Censo de Población y Vivienda (2020) en conjunto con datos de CONEVAL (2020) y el Directorio Nacional de Unidades Económicas (2022b), se analizó la zona de estudio en las escalas municipio, colonia y manzana. En la escala municipal se caracterizan los contrastes que existen entre los municipios de la región, mientras que a escala de manzana se realiza el análisis y en la escala de colonias (barrios) se presentan los resultados.

El primer acercamiento a la información se hizo mediante un análisis de densidad de Kernel, con el fin de identificar la congruencia entre la concentración de equipamientos y las necesidades por la concentración de población.

La técnica de densidad de Kernel se calculó mediante la suma en cada celda de tipo ráster, de equipamientos representados como puntos con un valor de 1 ajustados a una superficie curva, de manera que el valor de concentración disminuye hasta cero, a medida que aumenta la distancia desde el punto de valores más altos, considerando un vecindario circular (ArcGIS, 2022).

Posterior a ello, la investigación se limita a abordar los equipamientos de salud y educación mediante el cálculo de isócronas que permitan determinar las áreas sin disponibilidad de equipamientos en trayectos caminables.

En un segundo momento se estimaron los umbrales de movilidad a partir de isócronas de la plataforma (HeiGIT gGmbH, 2022), considerando trayectos caminables de entre 5 a 15 minutos, para el caso de servicios de salud y de 10 a 30 minutos, para los niveles educativos.

Finalmente, mediante la estimación del nivel de acceso a los equipamientos públicos educativos por el método 2SFCA (Cobertura flotante de dos pasos), se identificaron áreas que requieren fortalecer sus recursos.

Para los equipamientos educativos se aplicó el método 2SFCA considerando umbrales de movilidad de 10 a 30 minutos caminables y como

demanda la población total por manzana. El método 2SFCA se desarrolló de la siguiente manera:

Paso 1

Para cada escuela con un cierto número de ocupados (j), identificar la población de alumnos potenciales (k) que está dentro del umbral o radio de cobertura (d_0) de la localización (j) y calcular la proporción de ocupados/alumnos potenciales (R_j) dentro del área de influencia de (j) (Chen y Jia, 2019).

El resultado de este paso 1, es la proporción (ocupados/alumnos potenciales) en las áreas de influencia de las unidades económicas educativas. En términos matemáticos,

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{k \in \{d_{kj} \leq d_0\}} P_k},$$

dónde: P_k es la población potencial de alumnos (PO) en la manzana k , cuyo centroide está dentro del radio de influencia d_0 , S_j es el número de empleados en la unidad económica educativa j y d_{kj} es la distancia (o costo de transporte) entre k y j .

Paso 2

Esta fase es similar al paso 1, pero los cálculos determinan áreas de alcance desde los centroides de cada manzana, tomando como parámetro las isócronas por nivel educativo (ver cuadro 1). El resultado del paso 2, es la proporción ocupados/PO en las áreas de alcance de cada manzana. En este paso 2, las áreas de alcance se mueven o flotan de manzana a manzana hasta cubrirlas todas.

El paso 2 se sintetiza así, para cada localización de los alumnos potenciales (i : el centroide de cada manzana) identificar todos los ocupados j de las unidades económicas educativas en el nivel correspondiente que están dentro del umbral o radio de cobertura d_0 , desde la localización i y sumar

las proporciones alumnos potenciales/población objetivo R_j para todas las escuelas i (Chen y Jia, 2019),

$$A_i^F = \sum_{j \in \{d_{ij} \leq d_0\}} R_j = \sum_{j \in \{d_{ij} \leq d_0\}} \frac{S_j}{\sum_{k \in \{d_{kj} \leq d_0\}} P_k}$$

donde: A_i^F representa la accesibilidad en la manzana i , R_j es la proporción de ocupados/población total en la localización j que está dentro del área de alcance de i (esto es: $d_{ij} \leq d_0$), y d_{ij} es el umbral del área de alcance entre i y j . Los umbrales se ponderaron de acuerdo con la tabla 1. Mientras más alto sea el valor de A_i^F mayor será la accesibilidad de cada manzana donde radica la población objetivo.

Tabla 1. Ponderadores para isócronas por nivel educativo

Nivel educativo	Tiempo caminando	Ponderación
Preescolar	10	1
	15	0.75
	20	0.45
Primaria	10	1
	15	0.75
	20	0.5
Secundaria	10	1
	15	0.9
	20	0.8
Media superior	10	1
	15	1
	20	0.8
	30	0.5
Superior	10	1
	20	0.8
	30	0.5

Fuente: elaboración propia.

Resultados

Accesibilidad a equipamiento público de salud en la zona del PELT

En el polígono del Proyecto Ecológico para el Lago de Texcoco (PELT) los municipios y alcaldías de la zona con mayor cantidad de población son Ecatepec de Morelos, con 1 645 352 habitantes; Gustavo A. Madero con 1 173 351 habitantes y Nezahualcóyotl, con 1 077 208 habitantes, en estos se concentra también la mayor cantidad de actividades, incluidos los servicios prestados a través de equipamientos.

Por el contrario, los municipios de menor cantidad de población son Atenco con 75 489 habitantes y Tezoyuca con 47 044 habitantes. En Tezoyuca esto responde a la reducida superficie municipal correspondiente a 1 619 ha., no obstante, en Atenco que cuenta con una superficie de 8 707 ha, resalta su grado de preservación natural frente a la alta densificación habitacional que se vive en los municipios colindantes, y que contribuye a toda el área de estudio como un medio de regulación ambiental.

Esta situación ha convertido al municipio de Atenco en territorio disputado, debido al potencial de la superficie no urbanizada para megaproyectos que sirvan no sólo a la región, sino al Área Metropolitana de la Ciudad de México.

En los municipios y alcaldías considerados en el área de estudio se identificaron nueve 1 884 equipamientos, de los cuales el 67.6% son de carácter público (Directorio Nacional de Unidades Económicas, 2022a). Los equipamientos contemplados fueron la captación, tratamiento y suministro de agua realizados por el sector público, centros de impartición de justicia, bibliotecas, centros de acondicionamiento físico del sector público y privado, panteones, iglesias, oficinas administrativas del sector público, centros recreativos, escuelas de educación preescolar, primaria, secundaria, medio superior y superior del sector público y privado, así como escuelas especiales y de oficios, consultorios médicos, consultorios dentales, hospitales públicos y privados.

El municipio que concentró una mayor cantidad de equipamientos es Ecatepec, con 1 834, a este le sigue la alcaldía de Gustavo A. Madero, con

1 473, otro municipio con más de mil equipamientos es Nezahualcóyotl; por el contrario, los municipios con menor cantidad de equipamiento son Atenco y Tezoyuca, donde, respectivamente, se identificaron valores de 90 y 80 equipamientos en cada uno.

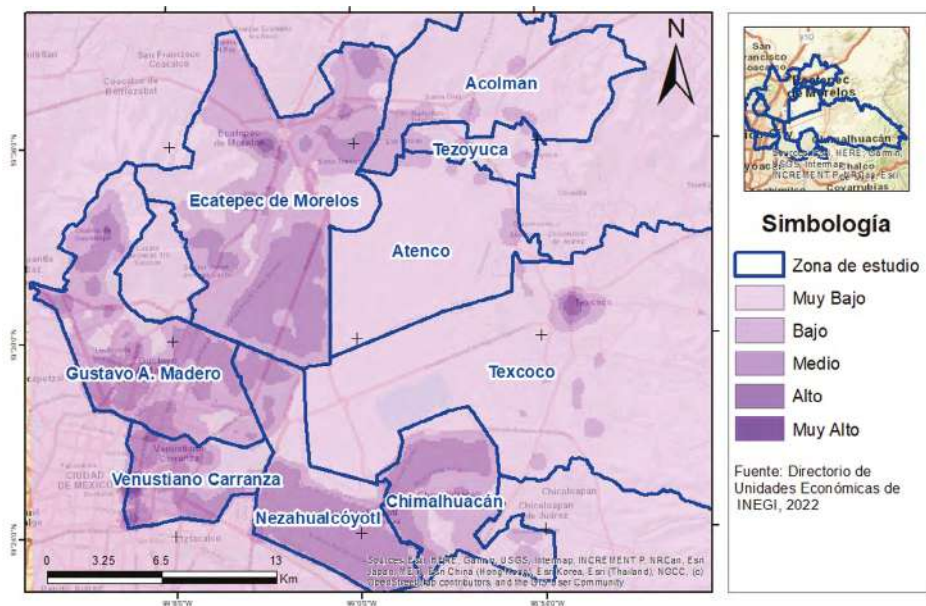
En el ámbito público priman las escuelas de educación preescolar y secundaria general, por el contrario, los equipamientos que se encuentran en menor medida son los relacionados con clínicas de especialidad y hospitales. A escala local, en cada uno de los municipios, la concentración de equipamientos se ocurre en las principales vialidades de carácter primario y secundario.

En la alcaldía Gustavo A. Madero, los equipamientos se localizan principalmente sobre avenida Tecnológico y avenida Venustiano Carranza, en Eje 1 poniente, Eje Central, avenida Insurgentes Norte, calzada de Los Misterios, así como en los cruces de Calzada a Chalma y avenida Cuauhtepac, en avenida Congreso de la Unión y Eje 3 Norte.

En la alcaldía Venustiano Carranza, sobre avenida Canal del Norte, avenida Congreso de la Unión, Eje 3 Sur, avenida Iztaccíhuatl, avenida Río Churubusco y Calzada Ignacio Zaragoza. En Nezahualcóyotl existen equipamientos distribuidos uniformemente por todo el municipio, mientras que en Ecatepec éstos se concentran en la cabecera municipal, la colonia Ruiz Cortines, jardines de Morelos, Ciudad Cuauhtémoc, Los Reyes Ecatepec, Ciudad Azteca, Miguel Hidalgo, Solidaridad, Hank González, Valle de Anáhuac, Jardines del Tepeyac y Valle de Aragón.

En Texcoco, los equipamientos se concentran en la cabecera municipal; en el municipio de Atenco la concentración de equipamiento se encuentra en la cabecera municipal, San Cristóbal Nexquiyapan, Santa Isabel Ixtapan y Nueva Santa Rosa. En Tezoyuca las concentraciones son hacia Tezoyuca, Tequisistlán y Nueva Santa Rosa. En el caso de Acolman se concentran en las localidades de Las Brisas, ampliación Lázaro Cárdenas, San Miguel Totolcingo, Anáhuac, primera sección y Acolman, centro. Finalmente, en Chimalhuacán, se concentra entre avenida del Peñón y avenida de las Torres (figura 1).

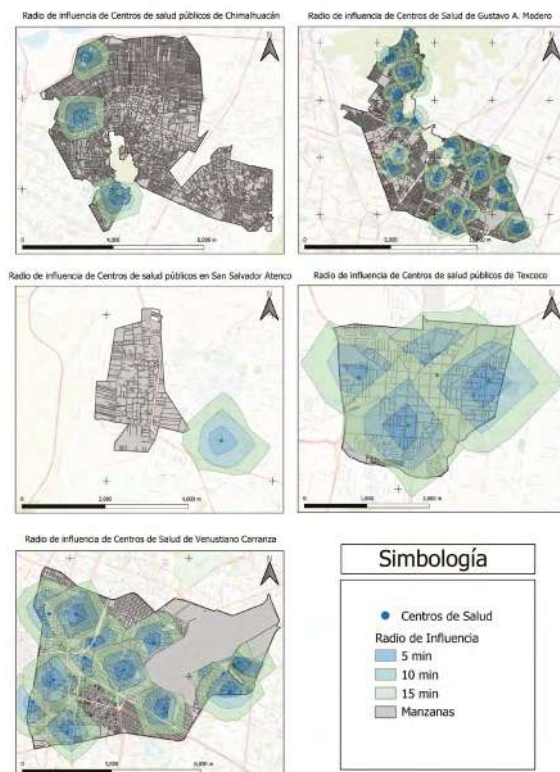
En la presente investigación se consideró la necesidad de la salud como uno de los principales factores de vulnerabilidad de la zona de estudio, debido a la cantidad de población que habita una zona geográfica en condiciones de alta urbanización, en detrimento de las condiciones ambientales.

Figura 1. Concentración de equipamientos en la zona del Proyecto del Lago de Texcoco

Fuente: Directorio de Unidades Económicas (2022).

Dicho esto, en la figura 2 y el cuadro 2 se presenta la cobertura de equipamientos actual en distancias caminables de hasta 15 minutos. Es así como, en el 54.1% de la población que habita los municipios y alcaldías contempladas no existiría accesibilidad caminando a algún servicio de salud, las peores condiciones se presentan en los municipios de Ecatepec donde 97.1 % de la población no cuenta con acceso peatonal a los servicios de salud, a este le sigue Atenco con el 91.8% de la población. Ecatepec es el municipio de mayor densidad poblacional en la zona de estudio, mientras que Atenco presenta una de las densidades más bajas, es decir que, en Ecatepec, a pesar de la existencia de unidades de salud, éstas son insuficientes debido a la demanda, por el contrario, en Atenco es casi nula la existencia de este servicio.

En la alcaldía Gustavo A. Madero se presenta cobertura total, ya que el 59.0% de la población podría tener acceso a un servicio de salud público en menos de 10 minutos, mientras que el resto, en trayectos de hasta 15 minutos. La alcaldía Venustiano Carranza se puede considerar también

Figura 2. *Isócronas de cobertura de salud pública en los municipios de estudio*

Fuente: elaboración propia con base en Centros de Salud, 2022; hospitales públicos en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2020; Directorio de Unidades Económicas (2022).

Tabla 2. *Cobertura de unidades de salud públicas en trayectos caminables*

<i>Municipio</i>	<i>Población total</i>	<i>Sin cobertura</i>		<i>5 minutos</i>		<i>10 minutos</i>		<i>15 minutos</i>	
		<i>Población</i>	<i>%</i>	<i>Población</i>	<i>%</i>	<i>Población</i>	<i>%</i>	<i>Población</i>	<i>%</i>
Atenco	75,489	69,331	91.8	0	-	1,416	1.9	4,742	6.3
Chimalhuacán	705,193	484,795	68.7	13,528	1.9	65,098	9.2	141,772	20.1
Ecatepec de Morelos	1,645,352	1,598,357	97.1	862	0.1	12,212	0.7	33,921	2.1
Gustavo A. Madero	1,173,351	-	-	195,431	16.7	496,446	42.3	481,474	41.0
Texcoco	277,562	-	-	7,323	2.6	26,603	9.6	243,636	87.8
Venustiano Carranza	443,704	186,937	42.1	16,058	3.6	76,729	17.3	163,980	37.0
Total	4,320,651	2,339,420	54.1	233,202	5.4	678,504	15.7	1,069,525	24.8

Fuente: elaboración propia con base en Centros de Salud, 2022; hospitales públicos en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2020; Directorio de Unidades Económicas, 2022.

una de las mejor servidas, ya que alrededor del 21.0% de la población puede acceder a servicios de salud públicos en menos de 10 minutos, sólo al sur se observa la ausencia de servicios de salud pública, no obstante, cuenta con hospitales que generan servicios especializados y tienen un mayor alcance territorial, además existe oferta con cobertura suficiente del sector privado.

El municipio de Texcoco, por sus dimensiones y distribución territorial de unidades de salud, tanto públicas como privadas, presenta una cobertura total. En el municipio de Acolman, la cobertura de acceso a los servicios de salud públicos no existe y en el caso de los privados cubren toda el área urbana. El municipio de Tezoyuca, por sus dimensiones, tampoco cuenta con servicios de salud públicos, y los privados sólo cubren la parte norte.

Una forma de compensar la ausencia de servicios públicos es a través de servicios privados, sin embargo, esto sólo es opción para quienes cuentan con capacidad adquisitiva.

Una forma de compensar la ausencia de servicios públicos es a través de servicios privados, sin embargo, esto sólo es opción para quienes cuentan con capacidad adquisitiva.

Equipamiento educativo en San Salvador Atenco y municipios colindantes

En los municipios de San Salvador Atenco, Tezoyuca y Acolman, derivado del intento de implantación del proyecto del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México se desató con mayor profundidad la disputa territorial, que a su vez genera fractura y fragmentación social. En este sentido, se vuelve indispensable considerar el derecho a la educación como un camino para la formación de criterios de reflexión y comprensión para la toma de decisiones informadas que permitan el consenso en favor de la conservación y prestación de servicios ambientales.

Un primer paso es contar con la disponibilidad de escuelas de educación básica en trayectos caminables, no mayores a 15 minutos de su vivienda. Sin embargo, con base en los resultados de la estimación de accesibilidad peatonal a servicios educativos se puede aseverar que en Atenco, Tezoyuca y Acolman

poco más del 10.7% de niños de 3 a 5, años no cuentan con acceso peatonal a la educación preescolar, siendo el municipio más afectado Tezoyuca.

En tanto que los niños que sí cuentan con acceso a preescolares en trayectos caminables de 15 minutos o menos, lo hacen en escuelas que presentan una capacidad de entre 6 y 12 ocupados (entre los que se encuentran profesores, personal administrativo y de mantenimiento) por cada 1 000 infantes de 3 a 5 años, es decir con baja capacidad de atención. De forma específica, el municipio de Atenco presenta considerables zonas sin accesibilidad, a pesar de que, según datos de (INEGI, 2022) se mantiene una pirámide poblacional de base ancha, lo que indica que este tipo de servicio se debe reforzar en el municipio (ver tabla 3 y figura 3).

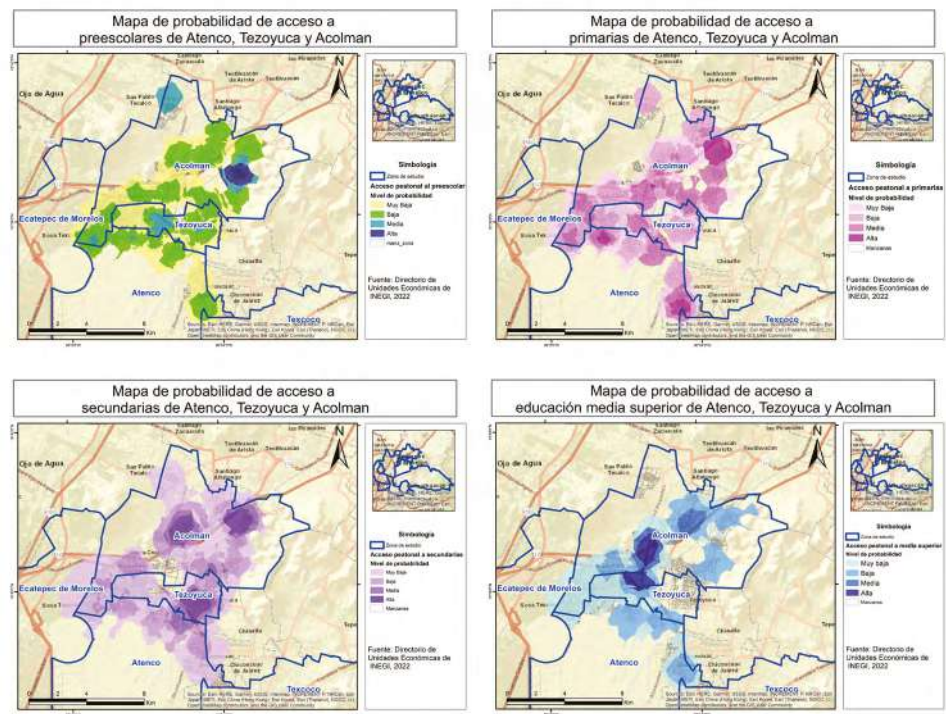
Tabla 3. Probabilidad de acceso a preescolar para personas de 3 a 5 años

Municipio	Población total	Acolman		Atenco		Tezoyuca	
		Totales	%	Totales	%	Totales	%
Población total	12,264	6,555	53.4	2,894	23.6	2,815	23.0
Sin accesibilidad	1,311	272	4.1	63	2.2	976	34.7
Muy baja (5 ocupados ó menos por cada 1 000 alumnos)	3,575	1,724	26.3	1,007	34.8	844	30.0
Baja (6 a 12 ocupados por cada 1 000 alumnos)	6,641	4,052	61.8	1,820	62.9	769	27.3
Media (12 a 28 ocupados por cada 1 000 alumnos)	603	373	5.7	4	0.1	226	8.0
Alta (29 a 54 ocupados por cada 1 000 alumnos)	134	134	2.0	-	-	-	-

Fuente: Directorio de Unidades Económicas (2022).

Al considerar todos los niveles educativos en los municipios, las primarias públicas presentan la menor proporción de niños de 6 a 11 años sin accesibilidad en trayectos caminables menores a 15 minutos (menor al 6.7%). No obstante, más del 75% de los niños lograría acceder caminando a primarias con capacidad superior a los 6 ocupados (entre los que se encuentran profesores, personal administrativo y de mantenimiento) por cada 1 000 niños (ver tabla 4 y figura 3).

Figura 3. Accesibilidad potencial a servicios educativos en los municipios de Atenco, Tezoyuca y Acolman



Fuente: Elaboración propia con base en Directorio de Unidades Económicas (2022).

Tabla 4. Probabilidad de acceso a educación primaria para personas de 6 a 11 años

Municipio	Población total	Acolman		Atenco		Tezoyuca	
		Totales	%	Totales	%	Totales	%
Población total	27 267	16 046	58.8	6 761	24.8	4 460	16.4
Sin accesibilidad	1 284	1 067	6.6	217	3.2	0	-
Muy baja (5 ocupados ó menos por cada 1 000 alumnos)	3 165	1 188	7.4	970	14.3	1 007	22.6
Baja (6 a 12 ocupados por cada 1 000 alumnos)	11 849	6 718	41.9	2 752	40.7	2 379	53.3
Media (12 a 28 ocupados por cada 1 000 alumnos)	9 809	6 744	42.0	1 991	29.4	1 074	24.1
Alta (29 a 54 ocupados por cada 1 000 alumnos)	1 160	329	28.4	831	12.3	0	-

Fuente: Directorio de Unidades Económicas (2022).

En los municipios de Atenco, Tezoyuca y Acolman para el nivel de escolaridad secundaria 52.9% de los jóvenes de 10 a 14 años presentan accesibilidad peatonal baja en distancias de hasta 15 minutos, ya que las escuelas cuentan con 5 ocupados o menos por cada 1 000 de ellos, es decir tienen una baja capacidad, a pesar de que este tipo de equipamiento tiene una distribución uniforme en el área urbana (ver tabla 5 y figura 3).

Tabla 5. Probabilidad de acceso a educación secundaria para personas de 10 a 14 años

<i>Municipio</i>	<i>Población total</i>	<i>Acolman</i>		<i>Atenco</i>		<i>Tezoyuca</i>	
		<i>Totales</i>	<i>%</i>	<i>Totales</i>	<i>%</i>	<i>Totales</i>	<i>%</i>
Población total	22 967	13 661	59.5	5 539	24.1	3 767	16.4
Sin accesibilidad	775	343	2.5	314	5.7	118	3.1
Muy baja (5 ocupados ó menos por cada 1 000 alumnos)	12 148	6 973	51.0	2 975	53.7	2 200	58.4
Baja (6 a 12 ocupados por cada 1 000 alumnos)	8 870	5 618	41.1	2 198	39.7	1 054	28.0
Media (12 a 28 ocupados por cada 1 000 alumnos)	182	105	0.8	52	0.9	25	0.7
Alta (29 a 54 ocupados por cada 1 000 alumnos)	992	622	4.6	-	-	370	9.8

Fuente: Directorio de Unidades Económicas (2022).

En la educación media superior se presenta el mayor déficit de accesibilidad, ya que 30.0% de las personas de 15 a 19 años no tendrían accesibilidad en 15 minutos o menos. Además, quienes tienen acceso es bajo, con 6 a 12 ocupados por cada 1 000 alumnos, por lo que se presenta la necesidad de reforzar la capacidad, ya que pueden existir desplazamientos a otros municipios con una mayor capacidad como Texcoco (ver tabla 6 y figura 3).

Tabla 6. Probabilidad de acceso a educación media superior para personas de 15 a 19 años

<i>Municipio</i>	<i>Población total</i>	<i>Acolman</i>		<i>Atenco</i>		<i>Tezoyuca</i>	
		<i>Totales</i>	<i>%</i>	<i>Totales</i>	<i>%</i>	<i>Totales</i>	<i>%</i>
Población total	14 867	7 606	51.2	4 176	28.1	3 085	20.8
Sin accesibilidad	4 468	1 977	26.0	875	21.0	1 616	52.4
Muy baja (5 ocupados ó menos por cada 1 000 alumnos)	3 575	1 724	22.7	1 007	24.1	844	27.4
Baja (6 a 12 ocupados por cada 1 000 alumnos)	4 975	2 191	28.8	2 294	54.9	490	15.9
Media (12 a 28 ocupados por cada 1 000 alumnos)	1 287	1 287	16.9	-	-	-	-
Alta (29 a 54 ocupados por cada 1 000 alumnos)	562	427	5.6	-	-	135	4.4

Fuente: Directorio de Unidades Económicas (2022).

Discusión

La zona denominada PELT que ha suscitado preocupación política y académica por la afectación derivada de NAICM, presenta condiciones diferenciadas entre los municipios que la componen. En esta zona la dinámica centro-periferia condiciona el acceso a equipamientos para los municipios mayormente afectados por el proyecto y de carácter rural, al respecto se puede hablar de la distribución en una jerarquía urbana que fomenta viajes pendulares, pero que no todos los habitantes pueden generar. De forma que municipios como Acolman, Tezoyuca y Atenco dependen de Texcoco o incluso de alcaldías de la Ciudad de México para cubrir sus necesidades básicas, como la atención a la salud y la educación.

La cantidad de equipamientos y su jerarquía a escala municipal tiene que ver principalmente con la población de cada municipio, lo que permite generar agrupamientos de servicios especializados en la región. De forma tal que en este estudio se identifican tres tipos de municipio afectados por la propuesta del NAICM, para el caso, alcaldías de la Ciudad de México en donde se cuenta con una alta cobertura de equipamiento tanto público como privado, además del fácil acceso a transporte y se garantiza el derecho a la salud en trayectos caminables; municipios de alta densidad poblacional del Estado de México, donde a pesar de existir una alta cantidad de equipamientos, su distribución se concentra en las cabeceras municipales y vías principales, de forma que no se alcanza a abastecer a la población asentada en las periferias donde adicionalmente se presentan condiciones de carencias según CONEVAL, 2020 y municipios semirurales con menor tamaño en el área urbana, donde a pesar de existir una baja densidad poblacional, el equipamiento en varios casos es inexistente. Cabe señalar que a medida que se reduce el número de equipamientos, también se reduce su accesibilidad en el territorio.

En este texto se analizó la accesibilidad a dos tipos de equipamiento: los de salud y educativos, ya que son los que requieren una mayor atención, por su importancia para el fortalecimiento comunitario según lo establecido por los decenios internacionales de las poblaciones del mundo 1995-2004 y 2005-2015; así como en los Objetivos del Desarrollo Sostenible 3 Salud, y

4 Educación, así como el Acuerdo de París (Conde, 2022), así como por su carencia en la zona. Para el caso del equipamiento de salud requiere reforzarse en municipios como Ecatepec y Chimalhuacán, mientras en que en municipios como Acolman, Atenco y Tezoyuca es urgente la implementación de unidades que cubran la atención pública, ya que si bien existe en algunos casos la atención privada, el acceso está condicionado a un pago.

De acuerdo con recorridos en campo de los municipios de Atenco y Acolman se observó que quienes asisten en su mayoría a obtener servicios de atención a la salud son mujeres y personas de más de 30 años, con acompañantes, pero sin espacios para los segundos. Asimismo, de forma complementaria se identificaron otros espacios estratégicos desde los que se realizan jornadas de salud, como la iglesia y la plaza principal.

En el caso de los equipamientos de educación, se distribuyen principalmente en los municipios más poblados, sin embargo, en los municipios predominantemente rurales, su distribución es escasa. En este caso el análisis se delimitó a los municipios menos beneficiados, ya que se consideran centros de cohesión e interacción social, a través de los cuales se pueden regenerar lazos sociales en el mediano plazo y generar una cultura del cuidado de los recursos y tradiciones.

Con base en lo antes expuesto, en las colonias periféricas es indispensable dotar de preescolares que contribuyan en trayectos caminables a su acceso. La distribución de escuelas de educación primaria es la de mayor cobertura, sin embargo, a medida que incrementa el nivel educativo, se reduce la probabilidad de acceso peatonal, volviendo necesario el traslado a otros municipios como Texcoco, en los niveles de secundaria y medio superior.

Con el presente estudio, se aporta una metodología replicable para medir y mejorar la accesibilidad a equipamiento urbano desde el cual se le retribuye a los habitantes que permiten la preservación de bienes ambientales, para lograr mejores resultados en la reflexión para soluciones locales y sin la presión de verse obligados a vender sus tierras ante problemas de salud (Ander-Egg, 2003; Conant y Fadem, 2011). No obstante, a pesar de la necesaria implementación de nuevos equipamientos en la zona, las disputas territoriales actuales complican las posibles cesiones de terrenos, por lo que se convierten en alternativas el aumento en la capacidad de los equipamientos existentes y mejorar las condiciones de movilidad motorizada y no motorizada.

Conclusiones

En esta investigación, se aborda la accesibilidad potencial como una dimensión del ordenamiento territorial desde la escala local. En específico se estudió la referida a los equipamientos de salud y educación, ya que éstos se consideran vitales para los derechos de los habitantes de áreas rururbanas, quienes se encargan de preservar los servicios ambientales de regiones urbanas. A diferencia de otros estudios sobre accesibilidad potencial (Galindo Pérez y Suárez Lastra, 2018; Garrocho, Carlos; Chávez-Soto, Tania; Álvarez-Lobato, 2020; Moreno Jiménez y Bosque Sendra, 2010; Pitarch-Garrido *et al.*, 2018b) resaltan los resultados para una zona urbana.

Uno de los principales aportes de esta investigación es su replicabilidad a otros estudios, a partir del uso de métodos para el tratamiento de información espacial que develan la cobertura y el nivel de accesibilidad en trayectos caminables para grupos específicos de población, como la densidad de Kernel y el análisis 2SFCA.

Como parte de los resultados se evidenció la baja distribución de servicios de salud y educativos para las áreas rururbanas de zona del PELT, que motivan a realizar desplazamientos continuos hacia zonas de mayor urbanización para compensar estas carencias, como también se observó en los estudios de (Garrocho, Carlos; Chávez-Soto, Tania; Álvarez-Lobato, 2020; Pitarch-Garrido *et al.*, 2018b; Xu *et al.*, 2018). Sin embargo, no debería asociarse la preservación de servicios ambientales con la ausencia y déficit de equipamientos que vulneren los derechos de sus comunidades. Al respecto, una potencialidad que se presenta en los municipios de Acolman, Atenco y Tezoyuca es la concentración de la población en sus cabeceras municipales, que puede aprovecharse para una mejor dotación de servicios, sin que ello implique la densificación desmedida y especulación.

En futuros estudios, se sugiere aplicar los métodos mostrados para analizar la distribución de otros servicios que son utilizados por estas comunidades diariamente, y que contribuyen a generar cohesión social. Otro análisis relevante puede ser el estudio de cambio en el uso de suelo y la evolución de la interacción con municipios cercanos, mediante el uso de técnicas espacio-temporales.

Se requiere preservar a las poblaciones que ayudan a regular las condiciones medioambientales y culturales, con el rescate de sus conocimientos y necesidades, garantizando el acceso a bienes básicos como la salud y la educación, de lo contrario, se tomará el destino a la depredación social, cultural y ambiental.

Referencias

- Ander-Egg, E. (2003). La problemática del desarrollo de la comunidad (E. Ander-Egg, ed.; 3ra ed.). Universidad Especializada de las Américas.
- ArcGIS. (2022, noviembre 20). Densidad de Kernel. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-kernel-density-works.htm#:~:text=La%20Densidad%20kernel%20calcula%20la,curva%20uniforme%20sobre%20cada%20punto>.
- Avineri, E., Shinar, D., & Susilo, Y. O. (2012). Pedestrians' behaviour in cross walks: The effects of fear of falling and age. *Accident Analysis & Prevention*, 44(1), 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.11.028>
- Bosque Sendra, Joaquín; Moreno Jiménez, A. (2012). La localización óptima como problema: cuestiones teóricas y metodológicas. En A. Bosque Sendra, Joaquín; Moreno Jiménez (ed.), *Sistemas de Información Geográfica y Localización Óptima de Instalaciones y Equipamientos* (2da ed.). Ra-Ma.
- Bournazou, E. (2008). La segregación social del espacio y la dimensión territorial, en los estudios de pobreza urbana. En A. Cordera, R., Ramírez, P. y Zicardi (Ed.), *Pobreza, desigualdad y exclusión social en la ciudad del siglo XXI. Siglo XXI*.
- Cáceres, C., & Ahumada, G. (2020). Acceso a equipamiento urbano y calidad de vida. Quilpué y Villa Alemana, Chile. *Bitácora Urbano Territorial*, 30(3), 263–275. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v30n3.86844>
- Cáceres-Seguel, C. (2016). Vivienda social periurbana en Santiago de Chile: la exclusión a escala regional del trasurbanita de Santiago de Chile. *Economía Sociedad y Territorio*, 171. <https://doi.org/10.22136/est002017664>
- Censo de Población y Vivienda 2020 (2020). <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html>
- Centros de Salud (2022).
- Chen, X., & Jia, P. (2019). A Comparative Analysis of Accessibility Measures by the Two-Step Floating Catchment Area (2SFCA) Method. *International Journal of Geographical Information Science*. <https://doi.org/10.1080/13658816.20>
- Conant, J., & Fadem, P. (2011). *Guía comunitaria para la salud ambiental* (J. Conant & P. Fadem, eds.; 1a ed.). Hesperian.
- Conde, K. (2022). *Manual para jóvenes indígenas sobre sus derechos territoriales* (Red de Jóvenes Indígenas de Latinoamérica y el Caribe, ed.). International Land Coal-

- tion, Indigenous Livelihoods Enhancement Partners, Nia Tero e Indigenous Peoples' Training Institute.
- Cortés, Y. (2021). Spatial Accessibility to Local Public Services in an Unequal Place: An Analysis from Patterns of Residential Segregation in the Metropolitan Area of Santiago, Chile. *Sustainability*, 13(2), 442. <https://doi.org/10.3390/su13020442>
- Curtis, S. (2003). *Health and Inequality: Geographical Perspectives*. SAGE Publications. <https://books.google.com.mx/books?id=DfiTEpzs8S4C>
- Directorio Nacional de Unidades Económicas (2022).
- Directorio Nacional de Unidades Económicas (2022).
- Dovey, K., & Pafka, E. (2020). What is walkability? The urban DMA. *Urban Studies*, 57(1), 93–108. <https://doi.org/10.1177/0042098018819727>
- Ewing, R., & Handy, S. (2009). Measuring the Unmeasurable: Urban Design Qualities Related to Walkability. *Journal of Urban Design*, 14(1), 65–84. <https://doi.org/10.1080/13574800802451155>
- Galeana, S. (2022). Hábitat, territorio y tejido social en la región nororiente de la Cuenca de México: el caso del espacio público de Atenco. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 12, 95–115. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i12.209>
- Galindo, C. (2016). Soy derechohabiente, pero la clínica está muy lejos. Accesibilidad a servicios de salud en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Galindo Pérez, C., & Suárez Lastra, M. (2018). Servicios de salud del ISSSTE en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, ¿Qué pasaría si nos enfermáramos todos? . En *gestión y política pública* (vol. 27, pp. 475–499). scielomx .
- Gao, Y., He, Q., Liu, Y., Zhang, L., Wang, H., & Cai, E. (2016). Imbalance in Spatial Accessibility to Primary and Secondary Schools in China: Guidance for Education Sustainability. *Sustainability*, 8(12), 1236. <https://doi.org/10.3390/su8121236>
- Garnica, R. (2012). Análisis espacial de los equipamientos educativos (oficiales) en la ciudad de Montería, Colombia. *Estudios socioterritoriales*, 12, 159–179. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1853-4392201-2000200007
- Garrocho, Carlos; Chávez-Soto, Tania; Álvarez-Lobato, J. Antonio. (2020). Accesibilidad de la población mayor a farmacias en el espacio intraurbano: desplazamientos caminando y el método de área de cobertura flotante. En A. (Coords.) Óscar Figueroa Monsalve, Luis Miguel Valenzuela Montes (Ed.), *Desafíos del desarrollo urbano sostenible en el transporte y la movilidad* (pp. 415-442.). El Colegio Mexiquense.
- Ghysais Chadid, G. A. (2018). Equipamientos colectivos y construcción de identidad urbana para producir competitividad en el municipio de Sincelejo [Maestría]. Universidad del Norte.
- Guimpert, I., & Hurtubia, R. (2018). Measuring, understanding and modelling the Walking Neighborhood as a function of built environment and socioeconomic variables. *Journal of Transport Geography*, 71, 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.07.001>

- Hare, T. S., & Barcus, H. R. (2007). Geographical accessibility and Kentucky's heart-related hospital services. *Applied Geography*, 27(3–4), 181–205. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2007.07.004>
- Harvey, D. (2003). Contested cities: social process and spatial form. En R. LeGates & F. Stout (eds.), *The city reader* (pp. 227–234). Routledge.
- HeiGIT gGmbH. (2022). Open Route Service. <https://openrouteservice.org/>.
- Hoskins, I., Kalache, A., & Mende, S. (2005). Hacia una atención primaria de salud adaptada a las personas de edad. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 17(5), 444–451.
- Islam, M., & Aktar, S. (2011). Measuring Physical Accessibility to Health Facilities – A Case Study on Khulna City. *World Health & Population*, 12(3). <https://doi.org/10.12927/whp.2011.22195>
- Juárez, M., y Velasco, G. (2017). Pobreza y salud. En F. López (ed.), *Geografía y pobreza, nuevos enfoques de análisis espacial* (pp. 65–108). Instituto de Geografía UNAM.
- Kaztman, R. (2001). Seducidos y abandonados. *CEPAL*, 75, 171–189.
- Lozano, J. L. S. (1996). La dimensión económica de las ciudades: una aproximación a las economías de aglomeración. *Boletín de Estudios Económicos*, 51, 579.
- Mardones, N.; Valdivia, J. y Aseguinolaza, I. (2020). La ciudad del cuarto de hora, ¿una solución sostenible para la ciudad postCOVID-19? *Ciudad y territorio, Estudios territoriales*, LII (2020), 653–664.
- Massey, D. (2005). *For Space*. SAGE Publications. https://books.google.com.mx/books?id=xgrVr6Y_3ZcC
- Mayorga-Henao, J. M. (2019). Equipamientos colectivos: “lugares” de producción de capital social. *Revista de Arquitectura*, 21(2). <https://doi.org/10.14718/RevArq.201-9.21.2.1906>
- Montes Galbán, E., Cerezo, Y., & Romero Méndez, A. (2020). Eficiencia y equidad espacial como principios para la planificación territorial de los establecimientos educativos: análisis de la educación primaria al sureste del municipio Maracaibo, Venezuela. *Anuario de la división de geografía*, 1–17. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/168837>
- Moreno, A. (2008). Los servicios colectivos y el desarrollo territorial: una reconsideración conceptual y metodológica actual. En A. Moreno & G. Buzai (eds.), *Análisis y planificación de servicios colectivos con sistemas de información geográfica*. UAM-AECID-UNLU.
- Moreno Jiménez, A., & Bosque Sendra, J. (2010). Los modelos de localización óptima como herramientas para la planificación territorial y urbana. *Ciudad y territorio: estudios territoriales*, 165, 461–480. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3361409&info=resumen&idioma=ENG>
- Moreno Sánchez, E., Rivero Hernández, M., & Velázquez Martínez, M. de los Á. (2018). El Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y su impacto en la región oriente del Estado de México. En E. Pérez Campuzano & V. E. Mota Flores (eds.), *Desarrollo regional sustentable y turismo: Vol. II* (1a ed., pp. 1–23). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://ru.iiec.unam.mx/3774/>

- Moreno-Sánchez, E. (2018). El nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México en el exlago de Texcoco, Estado de México: problemática socioterritorial y ambiental. *Revista CS*, 203–235. <https://doi.org/10.18046/recs.i24.2396>
- Pitarch-Garrido, M.-D., Salom Carrasco, J., & Fajardo Magraner, F. (2018). Detección de barrios vulnerables a partir de la accesibilidad a los servicios públicos de proximidad. El caso de la ciudad de Valencia. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 38(1), 61–85. <https://doi.org/10.5209/AGUC.60469>
- Rezago social a nivel zonas urbanas (AGEB urbanas) (2020).
- Rojas, Karla; Aguilar, A. G. (2021). Probabilidad de atención médica para los pobres en la Zona Metropolitana de Cuernavaca, Morelos, en 2018. *Economía, Sociedad y Territorio*, XXI(67), 835–864.
- Rojas Moreno, K. T. (2019). Los bienes públicos de salud en zonas pobres de Cuernavaca: condicionantes del acceso, 2010-2018 [Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sharma, G., & Patil, G. R. (2022). Spatial and social inequities for educational services accessibility - A case study for schools in Greater Mumbai. *Cities*, 122, 103543. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103543>
- Soto Coloballes, N. V. (2023). Un vuelo sin destino: el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 38(1), 131–161. <https://doi.org/10.24201/edu.v38i1.2103>
- Talen, E. (2001). School, Community, and Spatial Equity: An Empirical Investigation of Access to Elementary Schools in West Virginia. *Annals of the Association of American Geographers*, 91(3), 465–486. <https://doi.org/10.1111/0004-5608.00254>
- Torres, T., & Chías, L. (2013). Relación funcional metropolitana del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. IV Congreso de la Red Iberoamericana de investigación en Transporte Aéreo, 530–544.
- Xu, Y., Song, W., & Liu, C. (2018). Social-Spatial Accessibility to Urban Educational Resources under the School District System: A Case Study of Public Primary Schools in Nanjing, China. *Sustainability*, 10(7), 2305. <https://doi.org/10.3390/su10072305>

7. Análisis espaciotemporal de incendios forestales en ejidos del sur de la Península de Yucatán (2012-2021)

JOSÉ FRANCISCO LÓPEZ TOLEDO*

JOSÉ MANUEL CAMACHO SANABRIA**

JUAN CARLOS ALCÉRRECA HUERTA***

ROSALÍA CHÁVEZ ALVARADO****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.279.07>

Resumen

Los incendios forestales son una amenaza creciente para los recursos forestales y la biodiversidad. Su caracterización es de gran importancia para el diseño de estrategias de manejo del fuego. Por esta razón, se construyó un Índice Espaciotemporal de Incendios Forestales (IETIF), a partir del análisis de indicadores del régimen de incendios forestales para un periodo de diez años (2012-2021), tomando como unidad de análisis espacial los ejidos ubicados dentro del Área de Importancia para la Conservación de las Aves 197. Se calcularon indicadores de extensión, frecuencia, recurrencia y estacionalidad de los incendios, utilizando datos de puntos de calor y de perímetros de los conglomerados de puntos de calor del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales (SPPIF) de México. Los valores estandarizados de los indicadores y el IETIF fueron categorizados en cinco niveles para su

* Estudiante de doctorado en Geografía. Docente de la carrera de Ingeniería Forestal y del Posgrado en Agroecosistemas Sostenibles en el Tecnológico Nacional de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7080-2795>; correo: franck_lopez18@yahoo.com.mx

** Doctor en Ciencias Ambientales. Profesor-investigador de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Campus Chetumal Bahía, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0366-0613>; Scopus: 56820283800

*** Doctor en Ingeniería (Hidromecánica). Profesor-investigador de El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6325-3118>; Scopus: 2-s2.0-85128480694

**** Doctora en Asuntos Urbanos. Profesora-investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Campus Chetumal Bahía, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3468-9283>

posterior representación espacial. Los resultados permitieron identificar conglomerados de ejidos como zonas críticas de afectación por incendios, así como su relación con rasgos productivos que caracterizan a dichos ejidos, tales como la actividad agropecuaria y la presencia de áreas invadidas por *Pteridium aquilinum* en ejidos con IETIF muy alto y, por otro lado, ejidos con manejo forestal que presentaron IETIF bajo y muy bajo. Se sugiere establecer brigadas comunitarias de manejo del fuego en localidades ubicadas al centro de las zonas críticas.

Palabras clave: *régimen de incendios, extensión, frecuencia, recurrencia, estacionalidad.*

Introducción

Los incendios forestales son eventos que pueden afectar a las coberturas forestales, la biodiversidad y alterar los procesos hidrológicos en ecosistemas sensibles al fuego (Villar-Hernández *et al.*, 2022). Si bien pueden ocurrir de manera natural como parte de la ecología de sabanas, matorrales, bosques templados y boreales (Pompa-García *et al.*, 2018a), la alteración de los patrones espacio-temporales de los incendios forestales representa una amenaza crítica para los recursos forestales (Villar-Hernández *et al.*, 2022).

En los últimos diez años, en el mundo se ha incrementado 20% la duración de la temporada de incendios forestales debido al cambio climático (Zamudio *et al.*, 2023) y, con ello, la frecuencia, extensión y severidad (Pompa-García *et al.*, 2018a). Entre los incendios forestales de gran magnitud, ocurridos recientemente en el mundo, figuran los del Amazonas y el Ártico, en 2019; Australia en 2009, 2019 y 2020; Canadá en 2016; Chile en 2017; Grecia en 2007 y 2018; Indonesia en 2019; Portugal en 2003, 2005 y 2017; la Federación de Rusia en 2010; y los Estados Unidos de América en 2013, 2017, 2018 y 2019 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2021). En México, durante el periodo 1970 al 2019 se presentaron en promedio 7 095 incendios, con 260 998 hectáreas afectadas, anualmente, donde destacan los años de 1998, 2011 y 2017, como los más críticos por su extensión (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2020).

La comprensión de los patrones de distribución espacial y temporal de los incendios es de gran relevancia para su prevención y manejo (Zúñiga-Vásquez *et al.*, 2017; Gutiérrez Martínez *et al.*, 2018; Flores-Garnica *et al.*, 2021). En este sentido, la disciplina encargada de comprender los rasgos que definen el comportamiento del fuego y su relación con los efectos ecológicos en los organismos vivos y el entorno físico, es la ecología del fuego (Cochrane y Ryan, 2009). Dicha disciplina, a través del régimen de incendios, analiza indicadores de extensión, frecuencia, estacionalidad, intensidad y severidad en un área concreta, así como sus efectos ecológicos (Jardel *et al.*, 2014; Díaz-Delgado y Ruiz-Ramos, 2019).

La extensión es el tamaño de un incendio, mientras que la frecuencia mide cuán habituales son estos eventos en un ecosistema determinado. La recurrencia es el intervalo promedio de tiempo entre incendios en un área específica y está muy ligada a la frecuencia. La estacionalidad describe los períodos del año en los que los incendios son más comunes, típicamente limitándose a la estación seca o a periodos de sequía inusual (como en fenómenos de El Niño o La Niña). Sin embargo, las alteraciones de los atributos en un ecosistema pueden modificar el comportamiento del fuego y dar lugar a nuevos regímenes (Cochrane y Ryan, 2009; Díaz-Delgado y Ruiz-Ramos, 2019).

La caracterización del régimen de incendios es fundamental para comprender el papel del fuego en la estructura y función de los ecosistemas, por lo que es crucial para la planificación estratégica a largo plazo (Cochrane y Ryan, 2009). El análisis de estos rasgos se puede llevar a cabo mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y datos de sensores remotos (Zúñiga-Vásquez *et al.*, 2017; Gutiérrez Martínez *et al.*, 2018; Flores-Garnica *et al.*, 2021).

A nivel internacional, los SIG y datos de sensores remotos se han utilizado para detectar incendios a distintas escalas (Chuvieco, 2009; Chuvieco *et al.*, 2019; Briones-Herrera *et al.*, 2020), realizar comparaciones con registros de campo (Lim *et al.*, 2019), elaborar mapas de predicción (Murthy *et al.*, 2019), analizar factores causales (Reyes-Bueno y Balcázar-Gallegos, 2021), delimitar áreas quemadas (da Silva *et al.*, 2023) y evaluar la pérdida global de bosques por incendios (van Wees *et al.*, 2021; Tyukavina *et al.*, 2022).

En México, se han llevado a cabo estudios que caracterizan los incendios forestales en períodos de entre cinco y 20 años, tanto a nivel nacional como estatal, considerando variables ambientales y antropogénicas para generar modelos predictivos. Para esto se han utilizado indicadores de probabilidad de incendios (Villar-Hernández *et al.*, 2022; Zúñiga-Vásquez *et al.*, 2017; García *et al.*, 2012), frecuencia (Pompa-García *et al.*, 2018a; Gutiérrez Martínez *et al.*, 2018), índice de recurrencia (Pompa-García *et al.*, 2018b), superficie afectada (Vilchis-Francés *et al.*, 2015; Pérez-Verdín *et al.*, 2013; Gutiérrez Martínez *et al.*, 2018) y número de días requeridos para la extinción (Pérez-Verdín *et al.*, 2013), así como índices de afectación y severidad (Gutiérrez Martínez *et al.*, 2018).

Pompa-García *et al.* (2018b) propusieron un modelo conceptual del potencial de incendios mediante una sumatoria lineal estandarizada de valores asignados a los componentes de combustibles, meteorología, topografía y causas en polígonos previamente definidos. Por su parte, Gutiérrez Martínez *et al.* (2018) establecieron el régimen de incendios de vegetación en el Estado de México, categorizando los valores de cada variable para caracterizar los disturbios a nivel municipal y regional.

En lo que respecta a las fuentes de datos sobre incendios forestales, éstas son diversas, incluidas plataformas que ofrecen información sobre puntos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS. Un ejemplo de esto es el Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales (SPPIF) de México (<https://forestales.ujed.mx/incendios2/>).

A pesar de estos avances, la aplicación de herramientas SIG y productos de sensores remotos para el análisis espaciotemporal de incendios forestales en México, especialmente en sus ecosistemas tropicales, aún es limitada (Manzo-Delgado y López-García, 2020; Neger, Manzo-Delgado y Galicia-Sarmiento, 2022; Zamudio *et al.*, 2023).

Cabe destacar que las selvas son ecosistemas particularmente sensibles al fuego, ya que su estructura y biodiversidad pueden verse gravemente afectadas tras un incendio. Naturalmente, los incendios en estos ecosistemas son esporádicos y, en ocasiones, catastróficos, especialmente bajo condiciones meteorológicas propicias (Rodríguez-Trejo, 2008; Cochrane, 2009). La intervención humana ha alterado aún más el régimen del fuego en las selvas, en gran parte debido a la expansión de actividades agropecuarias,

con la pecuaria como un factor altamente asociado a los incendios, dado que el fuego se utiliza como herramienta de manejo de praderas (Flores-Garnica, 2021).

Por lo tanto, este trabajo busca integrar los rasgos espaciales y temporales que describen el régimen de incendios, con la finalidad de caracterizar el patrón de incendios a lo largo de un periodo corto (10 años) en espacios concretos (ejidos). El objetivo es construir un índice que analice y represente espacialmente los principales rasgos de los incendios forestales, facilitando la toma de decisiones en el manejo integral del fuego.

Método

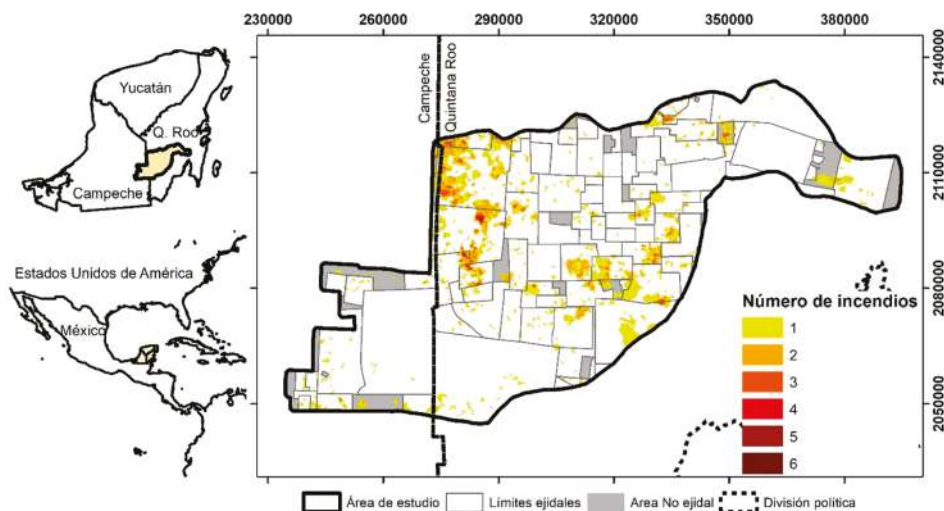
En el presente trabajo se propone un índice espaciotemporal de incendios forestales (IETIF), que integra variables de corte espacial, como la extensión, con aquellas de corte temporal, como la frecuencia, recurrencia y la estacionalidad de los incendios.

Se utilizó como zona de estudio un polígono ampliado en un kilómetro hacia su exterior del Área de Importancia para la Conservación de las Aves 197 (AICA-197), el cual tiene una extensión de 670 000 ha y se ubica en la porción sur de la Península de Yucatán, entre los estados mexicanos de Quintana Roo y Campeche (fig. 1). En el área de estudio predomina la vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia y de selva baja espinosa subperennifolia, así como usos de suelo con fines agropecuarios (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2018). La AICA 197 forma parte del corredor biológico Calakmul-Sian Ka'an y conecta a cinco Áreas Naturales Protegidas (ANP) (Díaz-Gallegos *et al.*, 2008; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2015).

Se emplearon puntos de calor (PC) y perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales correspondientes al período 2012–2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>). Los PC provienen de los sensores MODIS y VIIRS con resolución espacial de 1 000 y 375 m, respectivamente, a partir de los cuales se obtienen los PCPC mediante estimación rápida por interpolación automática (Briones-Herrera *et al.*, 2020).

Como unidad de análisis espacial, se seleccionaron los polígonos de los ejidos dentro del área de estudio (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017), resultando en 81 ejidos, algunos de los cuales fueron recortados debido a que su extensión se encontraba fuera del área de estudio. La elección de los ejidos se justifica por las diferencias en su percepción, organización y manejo del entorno, influenciadas por sus antecedentes culturales e históricos, lo que puede ofrecer variables explicativas relacionadas con la ocurrencia de incendios forestales (Ríos-Quiroz *et al.*, 2021).

Figura 1. Ubicación del área de estudio, que corresponde al Área de Importancia para la Conservación de la Aves (AICA) 197, se representa la frecuencia de incendios forestales en el periodo 2012-2021 y ejidos



Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales correspondientes al periodo 2012-2021, del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>) y perimetrales de los núcleos agrarios de los estados de Campeche y Quintana Roo (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017).

Mediante geoprocesamiento de los datos con el programa *ArcGis 10.8*[®] se calcularon cuatro indicadores descriptores de incendios: extensión (AQx), frecuencia (F), recurrencia (REC) y estacionalidad (EST) (cuadro 1), con los cuales se integraron en el IETIF, que permite hacer una clasificación de los ejidos en diferentes niveles de afectación, por incendios forestales.

Para el establecimiento del IETIF se construyó una matriz con los cuatro indicadores, cuyos valores fueron estandarizados a escala de 0 – 1, para lo cual se definió previamente el rango de datos como resultado de la diferencia entre los valores máximos y mínimos. Asimismo, la escala se dividió en cinco partes iguales cada una asignada a las categorías: *a)* muy bajo, *b)* bajo, *c)* medio, *d)* alto y *e)* muy alto (cuadro 1) (Flores-Garnica y Flores-Rodríguez, 2020). Mediante el promedio de los valores estandarizados se obtuvo el IETIF para cada ejido (ec. 1). Se elaboraron mapas de clasificación por semaforización de los ejidos de acuerdo con los cinco niveles establecidos, tanto de los cuatro indicadores calculados como del IETIF,

$$IETIF = \frac{\sum \text{AQr VE, Frec. VE, Rec. VE, Est. VE}}{4} \quad \text{ec. (1)}$$

Tabla 1. Indicadores espacio-temporales del régimen de incendios

Indicador	Rango de valores por nivel					Descripción
	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	
Extensión (AQr)	8.6% ≥	8.7% – 17.2%	17.3% – 25.8%	25.9% – 34.4%	34.5% ≤	Porcentaje de superficie ejidal con incendios
Frecuencia (Frec)	1 ≥	2	3	4	5 ≤	Número de incendios en un mismo polígono
Recurrencia (Rec)	4.32 ≤ y 0	3.63 - 4.31	2.94 - 3.62	2.25 - 2.93	1.56 - 2.24	Promedio de años entre incendios en un mismo polígono
Estacionalidad (Est)	0 – 2	3 – 4	5 – 6	7 – 8	9 ≤	Número de meses con incendios
Valores estandarizados (VE)	0.000 – 0.199	0.200 – 0.399	0.400 – 0.599	0.600 – 0.799	0.800 – 1	

Fuente: elaboración propia a partir de puntos de calor (PC) y perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012–2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>)

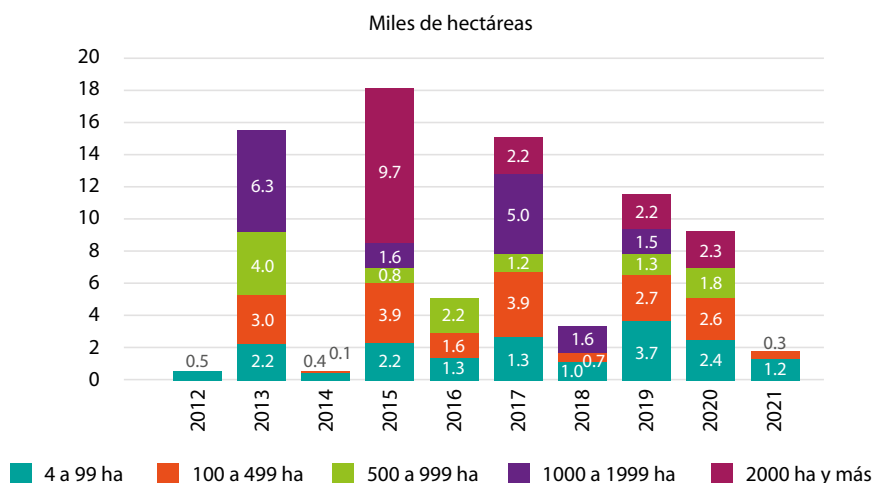
donde: AQr VE, Frec. VE, Rec. VE y Est. VE corresponden a los valores estandarizados de la extensión, frecuencia, recurrencia y estacionalidad de incendios, respectivamente.

Resultados

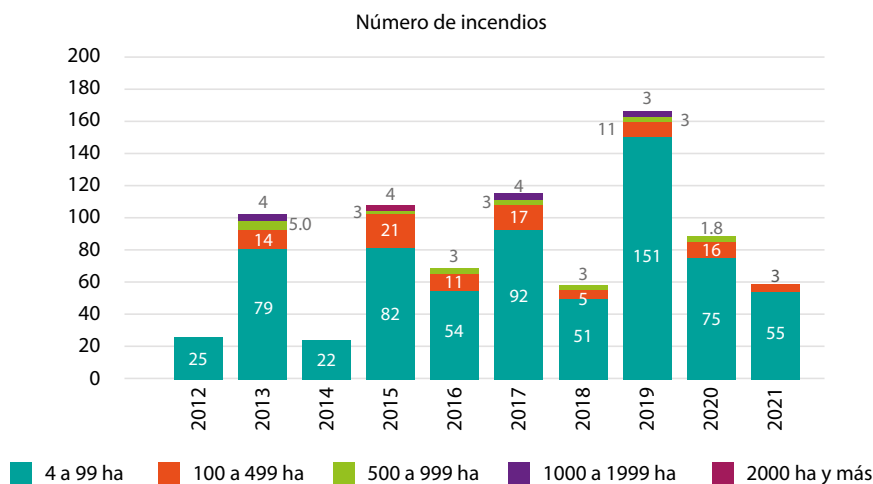
El análisis espacio-temporal de los incendios forestales, utilizando datos de los sensores MODIS y VIIRS, permitió obtener una comprensión del patrón de incendios en las selvas y áreas perturbadas del sur de la Península de Yucatán. En términos de extensión, se observó que durante el período de estudio (2012–2021), solo 9% de la superficie del área analizada (60 917.7 ha) experimentó incendios. De esta superficie, 44 526 ha (equivalente al 6.6%) se quemaron una única vez, representando el 73% del área total quemada, mientras que sólo el 27% registró una frecuencia superior a uno.

Se registró un total de 811 incendios, de los cuales la mayoría (84.5%) fueron de baja extensión (<100 ha), abarcando únicamente el 29% (17 693.5 ha) del área quemada durante el periodo considerado. En contraste, los incendios de mayor extensión (≥ 2000 ha) afectaron el 26% del área total, a pesar de ocurrir en sólo seis eventos (0.7%) (gráficas 1 y 2).

Gráfica 1. Clasificación de las superficies de incendios por clase de tamaño



Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012-2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>).

Gráfica 2. Número de incendios por clase de tamaño

Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012–2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>).

A continuación, se presenta la cartografía de los indicadores de extensión, frecuencia, recurrencia y estacionalidad de los incendios analizados en el AICA 197, durante el periodo 2012-2021. Este análisis revela cómo cada uno de estos indicadores prioriza de manera distinta las unidades espaciales (ejidos) examinadas.

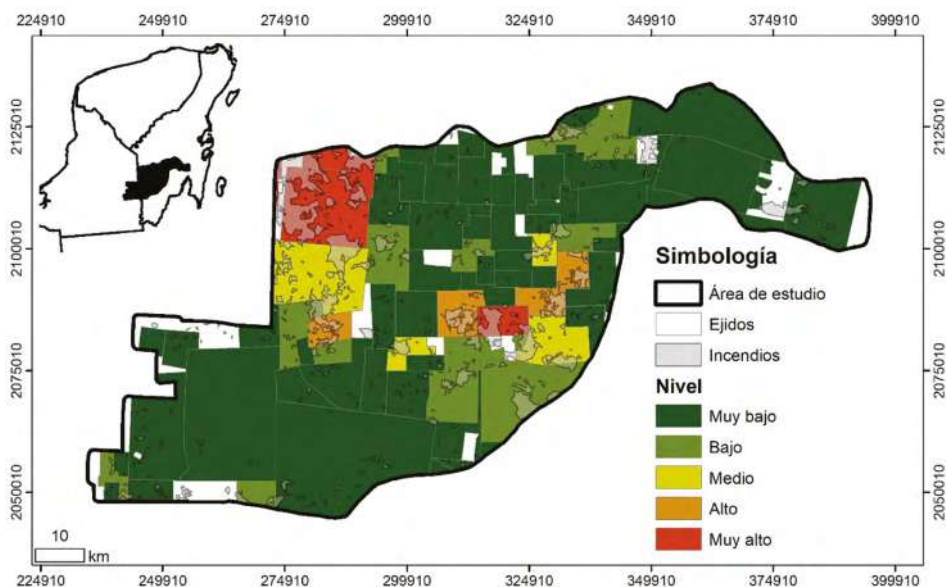
En el análisis espacial de la extensión, se identificaron dos conglomerados de ejidos con mayor afectación: el noroeste y el centro-este, donde se registró al menos un caso con nivel de afectación muy alto. Este indicador, de naturaleza espacial y poco sensible, clasificó en total a sólo cuatro ejidos con nivel muy alto, los cuales representan el 6% de la superficie del área de estudio. Es importante señalar que la actividad productiva predominante en estos ejidos es la agropecuaria, y algunos de ellos presentan áreas invadidas por *Pteridium aquilinum*. En contraste, la mayoría de los ejidos (55) se clasificaron con nivel muy bajo, ocupando el 62% de la superficie del área de estudio. Estos ejidos se distribuyen principalmente en las zonas norte-centro, noreste y suroeste, coincidiendo en gran medida con áreas de

coberturas forestales relativamente conservadas. Además, varios de estos ejidos implementan actualmente programas de manejo forestal (figura 2).

En el análisis de frecuencia, se reflejaron los mismos dos conglomerados que en la extensión, aunque sólo uno mostró dos casos con nivel muy alto, abarcando el 5% de la superficie del área de estudio. Este indicador también permitió identificar un tercer conglomerado en la parte noreste. A diferencia del indicador de extensión, la frecuencia es de tipo temporal y reveló un mayor número de ejidos con nivel alto (13), que representan el 14% del área de estudio. Se observó un menor número de ejidos con nivel muy bajo (33), entre los cuales se incluyen aquellos con una larga tradición de manejo forestal sustentable, como Noh Bec, Petcacab y Nuevo Becal (figura 3).

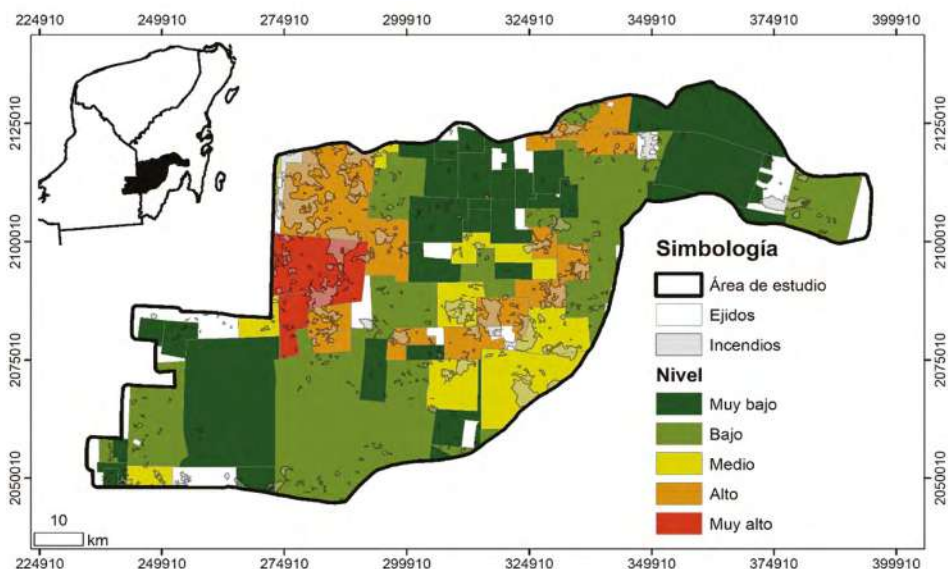
La recurrencia amplió considerablemente el número de ejidos clasificados en niveles medio (13), alto (14) y muy alto (12), conectando los tres conglomerados identificados en la extensión y la frecuencia, además de re-

Figura 2. Niveles de extensión de incendios forestales (según su proporción de área quemada) en ejidos ubicados dentro del área de estudio, para el periodo 2012-2021



Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales correspondientes al periodo 2012-2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>) y perimetrales de los núcleos agrarios de los estados de Campeche y Quintana Roo (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017).

Figura 3. Niveles de frecuencia (número de veces que han ocurrido incendios en un mismo sitio) de incendios forestales en ejidos del área de estudio, para el periodo 2012-2021



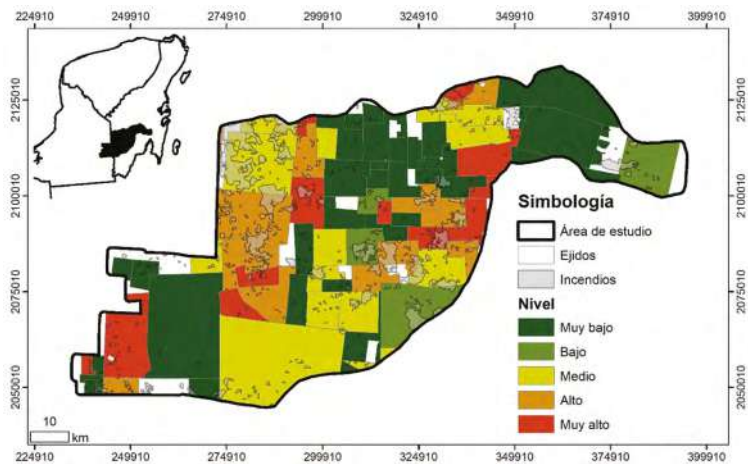
Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012-2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>) y perimetrales de los núcleos agrarios de los estados de Campeche y Quintana Roo (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017).

velar un cuarto conglomerado en el suroeste. Este indicador es especialmente sensible y relevante en la dimensión temporal, ya que indica que el 26% del área afectada ha experimentado incendios en más de una ocasión, con una frecuencia de ocurrencia en periodos cortos (aproximadamente dos años) (figura 4).

Por último, el análisis de estacionalidad mostró 11 ejidos con nivel muy alto, que ocupan el 20% de la superficie del área de estudio. Estos ejidos difieren de los identificados en la recurrencia, lo que resalta la sensibilidad de este indicador. Asimismo, se registró el menor número de ejidos con nivel muy bajo (30), que acumulan el 24% de la superficie total. Los meses con mayor incidencia de incendios fueron marzo, abril y mayo, que abarcaron el 83% de los eventos (figura 5).

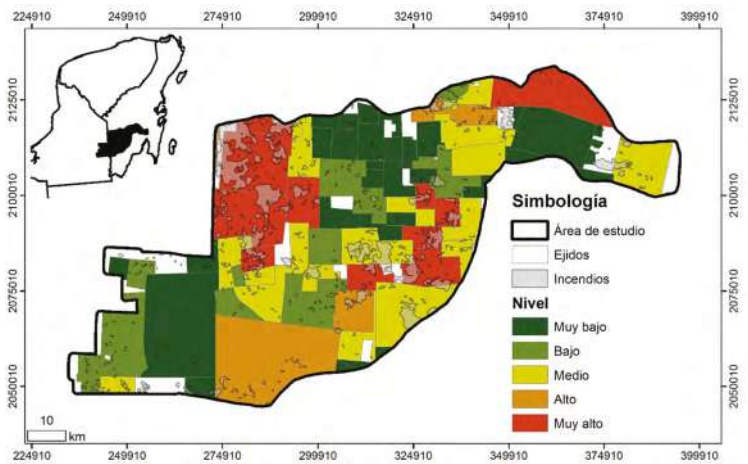
La integración de los cuatro indicadores (extensión, frecuencia, recurrencia y estacionalidad) permitió identificar cuatro conglomerados de eji-

Figura 4. Niveles de recurrencia (número de años transcurridos entre dos incendios consecutivos en el mismo sitio) de incendios forestales en ejidos del área de estudio para el periodo 2012-2021



Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012 – 2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>) y perimetrales de los núcleos agrarios de los estados de Campeche y Quintana Roo (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017).

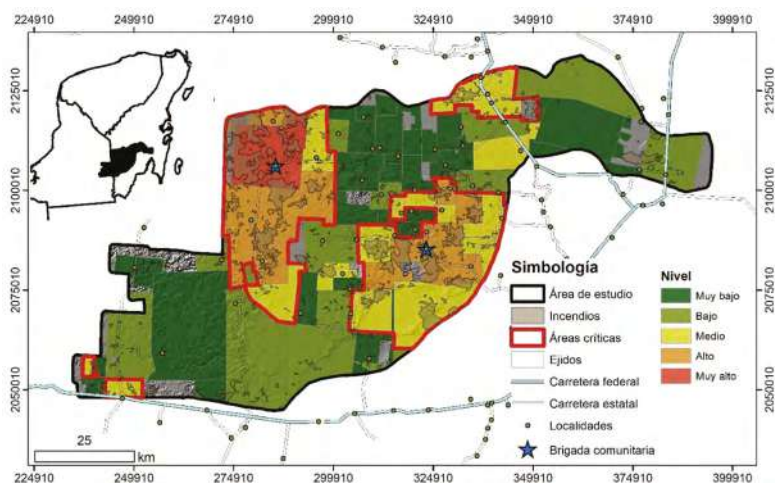
Figura 5. Niveles de estacionalidad (número de meses que duró la temporada de incendios) en los ejidos del área de estudio, para el periodo 2012-2021



Fuente: elaboración propia a partir de puntos de calor (PC) y perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012–2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>) y perimetrales de los núcleos agrarios de los estados de Campeche y Quintana Roo (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017).

dos. Sin embargo, dos de ellos son especialmente significativos por el número de ejidos que agrupan (>10) y por sus niveles de IETIF, alto y muy alto. Esta información es crucial para la implementación de estrategias concretas de manejo del fuego; por ejemplo, sería recomendable considerar las localidades situadas en el centro de estos conglomerados para establecer brigadas comunitarias de manejo del fuego (figura 6).

Figura 6. Niveles del índice espacio temporal de incendios forestales (IETIF) (2012–2021) en el Área de Importancia para la Conservación de la Aves 197, se consideran los ejidos como unidades espaciales



Fuente: elaboración propia a partir de perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC) históricos anuales, correspondientes al periodo 2012–2021 del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF; <http://forestales.ujed.mx/incendios2>) y perimetrales de los núcleos agrarios de los estados de Campeche y Quintana Roo (Registro Agrario Nacional [RAN], 2017). Se delimitan en rojo las áreas críticas y se señalan con estrellas azules los centros de población de los ejidos, donde se observa la necesidad de instaurar brigadas comunitarias de manejo del fuego.

Discusión

El uso de puntos de calor (PC) y perímetros de conglomerados de puntos de calor (PCPC), provenientes de los sensores MODIS y VIIRS, ha sido fundamental en este estudio. Estos insumos han sido procesados previamente de manera automatizada y están fácilmente accesibles a través del Sistema

de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México, una plataforma digital diseñada específicamente para este país (Briones-Herrera *et al.*, 2020).

Los métodos de geoprocésamiento aplicados con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para calcular los cuatro indicadores y el índice espacio temporal de incendios forestales (IETIF), son relativamente sencillos y fáciles de interpretar. Resultan cruciales para analizar la dinámica espaciotemporal de los incendios forestales a mesoescala, específicamente en unidades ejidales. Estos métodos han permitido identificar patrones de incendios en el sur de la Península de Yucatán durante el periodo de 2012 a 2021.

A diferencia de este estudio, investigaciones previas han analizado la distribución espacial y temporal de los incendios forestales a escalas más pequeñas, como municipal, estatal y nacional. Por ejemplo, Gutiérrez Martínez *et al.* (2018) utilizaron municipios y regiones del Estado de México para caracterizar el régimen de incendios, construyendo un índice de afectación que clasifica en cuatro niveles (nulo, bajo, medio y alto) durante un periodo de 11 años. Por su parte, Villar-Hernández *et al.* (2022) emplearon cuadrículas de 10 km² para analizar la densidad de puntos de calor en Oaxaca, en un marco temporal de 19 años. Zúñiga-Vásquez *et al.* (2017) también utilizaron cuadrículas de 0.5° (≈ 50 km) para identificar patrones de agrupamiento espacial de puntos de calor en México, a lo largo de 11 años.

Al proponer los ejidos como unidades de análisis espacial, se facilita la asociación entre la problemática de incendios y los antecedentes culturales y prácticas productivas locales. Esta perspectiva ayuda a comprender mejor los patrones espacio-temporales desde una perspectiva local. El IETIF ha permitido jerarquizar los ejidos del AICA 197, en cinco niveles de afectación, así como su representación cartográfica.

Los resultados destacan áreas críticas donde se agrupan ejidos con incendios de gran extensión (≥ 2000 ha) y reincidentes, diferenciándose de zonas con eventos más pequeños (< 100 ha) y sin repetición. Este comportamiento es similar al observado por Manzo-Delgado y Galicia-Sarmiento (2022) en áreas de uso agropecuario y vegetación secundaria. Otros autores, como Carrillo-García *et al.* (2012), Pérez-Verdín *et al.* (2013), Flores-Garnica *et al.* (2021), Villar-Hernández *et al.* (2022) y Zúñiga-Vásquez *et al.* (2017), han documentado patrones similares en diversas regiones de México utilizando técnicas de geoestadística. Estas áreas requieren atención y

evidencian la necesidad de implementar acciones de sensibilización, promoción de la cultura de manejo del fuego, formación de brigadas comunitarias, participación de distintos niveles de gobierno y el involucramiento de ejidos circundantes.

Un patrón adicional identificado es que los incendios de gran superficie (≥ 2000 ha) fueron escasos (sólo seis eventos), pero abarcaron una cuarta parte de la superficie total afectada. En contraste, los incendios de menor extensión (< 100 ha) fueron más comunes (84% de los casos) y afectaron áreas comparables a las de los incendios más grandes (29%). Este fenómeno coincide con observaciones de Neger *et al.* (2022) a nivel nacional, así como con los estudios de Manzo-Delgado y Galicia-Sarmiento (2022) en las selvas húmedas de la Reserva de la Biosfera Montes Azules, en Chiapas, y Gutiérrez-Martínez *et al.* (2018), en el Estado de México.

Se observó que en los ejidos más afectados predomina la actividad agropecuaria, y estos también presentan áreas invadidas por *Pteridium aquilinum*, una especie asociada al fuego. Esto respalda la evidencia de que la mayoría de los incendios forestales son provocados por actividades antropogénicas, como la agricultura y la ganadería, en las cuales se utiliza el fuego para preparar las tierras (Flores-Garnica *et al.*, 2021), especialmente en ecosistemas tropicales húmedos (Tyukavina *et al.*, 2022).

La baja proporción del área afectada por incendios (9%), junto con el hecho de que tres cuartas partes de esta superficie sólo registraron un evento durante el periodo analizado, sugiere una baja frecuencia de incendios. Esto concuerda con lo planteado por Rodríguez-Trejo (2008) y Cochrane y Ryan (2009), quienes indican que los incendios en las selvas suelen ser esporádicos, aunque catastróficos cuando ocurren. Por otro lado, en la pequeña porción que presentó una frecuencia mayor a un incendio, éstos ocurrieron en un promedio de dos años, lo que indica una elevada recurrencia. Esto es coherente con la observación de que los cambios en las coberturas forestales, cuando se transforman en pastizales o herbazales, también alteran el régimen de incendios, asemejándose al de una sabana, donde los incendios son recurrentes (Rodríguez-Trejo, 2014).

Por otro lado, se observó que los ejidos que implementan manejo forestal tienden a enfrentar menos problemas relacionados con incendios. Esto sugiere que mantienen selvas relativamente conservadas que almacenan

combustibles pesados y húmedos, lo que dificulta la propagación del fuego (Gutiérrez-Martínez *et al.*, 2018; Briones-Herrera *et al.*, 2019). Además, el manejo forestal fomenta la organización social para la prevención y control de incendios (Pérez-Verdín *et al.*, 2013).

Este análisis de caso se centró en una subregión con condiciones ambientales específicas de clima cálido subhúmedo y vegetación de selvas, que ha sido escasamente estudiada, a pesar de las crecientes amenazas de incendios. No obstante, el método propuesto puede aplicarse a otras condiciones ambientales. Se espera que este trabajo contribuya al manejo integral del fuego, la conservación de áreas forestales y el mantenimiento de regímenes de incendios, tal como lo proponen Cochrane y Ryan (2009) y Jardel *et al.* (2014).

Finalmente, la asociación con los rasgos culturales y productivos de los ejidos se fundamentó en el conocimiento previo de los autores sobre el área de estudio. Sin embargo, este trabajo abre la necesidad de realizar un análisis detallado sobre las coberturas y usos de suelo asociados a los incendios forestales, así como sobre la severidad y niveles de daño que estos incendios provocan en los ecosistemas. Estos estudios complementarios proporcionarían información valiosa sobre la ecología del fuego en la región y en este tipo de ecosistemas, que aún carecen de datos.

Conclusiones

El Índice Espaciotemporal de Incendios Forestales es una herramienta que permite analizar los rasgos del régimen de incendios en pequeñas unidades espaciales, como son los ejidos. Su aplicación evidencia patrones y una comprensión detallada de la dinámica de incendios forestales a escalas local y regional. El análisis de los indicadores de extensión, frecuencia, recurrencia y estacionalidad reveló la existencia de conglomerados de ejidos que enfrentan problemas graves relacionados con incendios. Estas áreas críticas, especialmente aquellas asociadas con actividades agropecuarias, se caracterizan por la invasión de especies inflamables, lo que incrementa el riesgo de incendios recurrentes.

Un hallazgo clave es que los ejidos con un manejo forestal adecuado presentan bajos niveles de IETIF, sugiriendo que estas prácticas promueven

la conservación de ecosistemas y reducen la propagación del fuego. Esto subraya la importancia de implementar estrategias de manejo del fuego que consideren las características socioeconómicas y ambientales de cada ejido.

Las técnicas aplicadas ofrecen una herramienta valiosa para la planificación y gestión de incendios forestales, resaltando la necesidad de acciones coordinadas entre los ejidos, los gobiernos locales y la comunidad en general para abordar esta problemática de manera efectiva. La identificación de áreas críticas y la promoción de una cultura de manejo del fuego son pasos esenciales hacia la mitigación de los incendios forestales y la conservación de los ecosistemas de la región.

Referencias

- Briones-Herrera, C. I., Vega-Nieva, D. J., Monjarás-Vega, N. A., Briseño-Reyes, J., López-Serrano, P. M., Corral-Rivas, J. J., Alvarado-Celestino, E., Arellano-Pérez, S., Álvarez-González, J. G., Ruiz-González, A. D., Jolly, W. M. & Parks, S. A. (2020). Near real-time automated early mapping of the perimeter of large forest fires from the aggregation of VIIRS and MODIS active fires in Mexico. *Remote Sensing*, 12(2061), 1-19. <https://doi.org/10.3390/rs12122061>
- Carrillo-García, R. L. C., Rodríguez-Trejo, D. A., Tchikoué, H., Monterroso-Rivas, A. I. & Santillán-Pérez, J. (2012). Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Interciencia*, 37(9), 678-683. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33925502012>
- Chuvieco, E. (2009). Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103(1), 173-181. <https://rac.es/ficheros/doc/00917.pdf>
- Chuvieco, E., Mouillot, F., van der Werf, G. R., San Miguel, J., Tanase, M., Koutsias, N., García, M., Yebra, M., Padilla, M., Gitas, I., Heil, A., Hawbaker, T. J. & Giglio, L. (2019). Historical background and current developments for mapping burned area from satellite earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 225, 45-64. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.013>
- Cochrane, M. A. (2009). Tropical Fire Ecology. Climate change, land use, and ecosystem dynamics. *Springer-Praxis*. 645.
- Cochrane, M. A. & Ryan, K. C. (2009). Fire and fire ecology: Concepts and principles. En: Cochrane M. A. (2009). Tropical Fire Ecology. Climate change, land use, and ecosystem dynamics. *Springer-Praxis*, 25-62.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio] (2015). *Áreas de importancia para la conservación de las aves, 2015, escala: 1:250000*. Sección Mexicana del Consejo Internacional para la Preservación de las Aves-Conabio. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/aicas15gw.html>

- Comisión Nacional Forestal [Conafor] (2020). Programa de Manejo del Fuego 2020-2024. Coordinación General de Conservación y Restauración-Gerencia de Manejo del Fuego. <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/>
- Da Silva, J. J. A., Pacheco, A. d. P., Ruiz-Armenteros, A. M., Henriques, R. F. F. (2023). Evaluation of the Ability of *SLSTR* (Sentinel-3B) and MODIS (Terra) Images to Detect Burned Areas Using Spatial Temporal Attributes and *SVM* Classification. *Forests*, 14(32), 1-23. <https://doi.org/10.3390/f14010032>
- Díaz-Delgado, D. & Ruíz-Ramos, J. (2019). La teledetección en la caracterización del régimen de incendios y de los efectos sobre la vegetación. En F. García-Novo, M. Casal, & J. G. Pausas (eds.), *Ecología de la regeneración de zonas incendiadas* (pp. 131-146). Academia de Ciencias Sociales y del Medio Ambiente de Andalucía – ACSYMA. <https://oro.open.ac.uk/59612/7/59612.pdf>
- Díaz-Gallegos, J. R., Mas, J. F. & Velázquez-Montes, A. (2008). Monitoreo de los patrones de deforestación en el Corredor Biológico Mesoamericano, México. *Interciencia*, 33(12), 882-890. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33913804>
- Flores-Garnica, J. G. & Flores-Rodríguez, A. G. (2020). Análisis comparativo del número e intervalos de clases de riesgo de incendios forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(62), 4-30. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i62.775>
- Flores Garnica, J. G. (2021). Antecedentes y perspectivas de la investigación en incendios forestales en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, Especial-1. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.981>
- Flores-Garnica, J. G., Reyes-Alvarado, A. G. & Reyes-Cárdenas, O. (2021). Relación espaciotemporal de puntos de calor con superficies agropecuarias y forestales en San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(64): 127-145. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.857>
- Gutiérrez-Martínez, G., Orozco-Hernández, M. E., Ordóñez-Díaz, J. A. B. & Camacho-Sanabria, J. M. (2018). Régimen y distribución de los incendios forestales en el Estado de México (2000 a 2011). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(29), 92-107. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i29.219>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2018). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, Serie VII. Conjunto Nacional*. Inegi. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>
- Jardel, E. J., Pérez-Salicrup, D., Alvarado, E. & Morfín-Ríos, J. E. (2014). Principios y criterios para el manejo del fuego en ecosistemas forestales: guía de campo. Comisión Nacional Forestal, 59. <https://www.gob.mx/publicaciones/es/articulos/principios-y-criterios-para-el-manejo-del-fuego-en-ecosistemas-forestales-guia-de-campo?idiom=es>
- Lim, Ch. H., Kim, Y. S., Won, M., Kim, S. J. & Lee, W. K. (2019). Can satellite-based data substitute for surveyed data to predict the spatial probability of forest fire? A geostatistical approach to forest fire in the Republic of Korea. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 719-739. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1543210>
- Manzo-Delgado, L. L. & López-García, J. (2020). Análisis espacial y temporal de áreas quemadas en 1998, 2003 y 2015 en la Reserva de la Biosfera Montes Azules, Chiapas, México. *Bosque*, 41(1), 11-24. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002020000100011>

- Murthy, K. K., Sinha, S. K., Kaul, R. & Vaidyanathan, S. (2019). A fine-scale state-space model to understand drivers of forest fires in the Himalayan foothills. *Forest Ecology and Management*, 432, 902–911. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.009>
- Neger, C., León-Cruz, J. F., Galicia-Sarmiento, L., & Manzo-Delgado, L. L. (2022). Dinámica espaciotemporal, causas y efectos de los megaincendios forestales en México. *Madera y Bosques*, 28(2), 1-21. <https://doi.org/myb.2022.2822453>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2021). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020-Informe principal. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- Pérez-Verdín, G., Márquez-Linares, M. A., Cortés-Ortiz, A. & Salmerón-Macías, M. (2013). Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 19(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192339>
- Pompa-García, M., Camarero, J., Rodríguez-Trejo, D. A. & Vega-Nieva, D. J. (2018a). Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico. *Chinese Geographical Science*, 28(1). <https://doi.org/10.1007/s11769-017-0928-0>
- Pompa-García, M., Vázquez-Vázquez, L., Zapata-Molina, M., & Solís-Moreno, R. (2018b). Modelo conceptual del potencial de incendios forestales en Durango: avances preliminares. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(13). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i13.492>
- Priego, S. A. G, Bocco, G., Mendoza, M. & Garrido, A. (2010). Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología-Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-Universidad Nacional Autónoma de México. <https://doi.org/10.22201/ciga.9789688179239p.2011>
- Registro Agrario Nacional [RAN] (2017). Datos geográficos perimetrales de los núcleos agrarios certificados por estado. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/datos-geograficos-perimetrales-de-los-nucleos-agrarios-certificados-por-estado>
- Reyes-Bueno, F., y Balcázar-Gallegos, C. (2021). Factores que inciden en la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 11(1), 50–60. <https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.2634>
- Ríos-Quiroz, D. del C., Castillo-Santiago, M. A., Guízar-Vázquez, F. y Medina-Sanson, L. (2021). Historia y cambios en el paisaje en dos ejidos de la Selva Lacandona, Chiapas. *Cuadernos Geográficos*, 60(2), 236–254. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i2.15813>
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2008). Fire regimes, fire ecology and fire management in Mexico. *AMBIO*, 37(7), 548-556. <http://dx.doi.org/10.1579/0044-7447-37.7.548>
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2014). Incendios de vegetación-Su ecología, manejo e historia. Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo, Semarnat, Programa de Prevención y Combate de Incendios Forestales, Conafor, Conanp, Parque Nacional Iztacchuatl-Popocatepetl, ANCF, AMPF.
- Tyukavina A., Potapov, P., Hansen, M. C., Pickens, A. H., Stehman, S. V., Turubanova, S., Parker, D., Zalles, V., Lima, A., Kommareddy, I., Song, X-P, Wang, L. & Harris, N. (2022) Global trends of forest loss due to fire from 2001 to 2019. *Frontiers in Remote Sensing*, 3(825190), 1-20. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.825190>

- van Wees, D., van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Andela, N., Chen, Y., and Morton, D. C. (2021). The role of fire in global forest loss dynamics. *Global Change Biology*, 27(11), 2377–2391. <https://doi.org/10.1111/gcb.15591>.
- Vilchis-Francés, A. Y., Díaz-Delgado, C., Magaña-Lona, D., Bâ, K. M., & Gómez-Albores, M. Á. (2015). Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del río Balsas. *Agrociencia*, 49(7), 803-820. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000700008&lng=es&tlng=es.
- Villar-Hernández, B. J., Pérez-Elizalde, S., Rodríguez-Trejo, D. A., & Pérez-Rodríguez, P. (2022). Análisis espaciotemporal de la ocurrencia de incendios forestales en el estado mexicano de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(74): 120-144. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1274>
- Zamudio, D. A. C., Guerra, B. R., Vázquez, J. L. A., Garnica, J. G. F., Avilés, L. C., Aguilar, R. T., Cantú, D. H. N., Bautista, A. A., Hernández, J. M., Quiroz, D. C., Nava, N. T., & Hernández, R. G. (2023). Trends in global and Mexico research in wildfires: A bibliometric perspective. *Open Journal of Forestry*, 13, 182-199. <https://doi.org/10.4236/ojf.2023.132012>
- Zúñiga-Vásquez, J. M., Cisneros-González, D., Pompa-García, M., Rodríguez-Trejo, D. A., y Pérez-Verdín, G. (2017). Modelación espacial de incendios forestales en México: una integración de dos fuentes de datos. *Bosque*, 38(3), 563-574. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000300014>

8. Análisis espacial de la región minera El Oro y Tlalpujahua, Michoacán, México, en los siglos XVIII-XIX

PEDRO GÓMEZ MOLINA*

PEDRO SERGIO URQUIJO TORRES**

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.279.08>

Resumen

La presente investigación se enfoca en la interpretación y descripción de mapas históricos entre los siglos XVIII-XIX, los cuales permitieron analizar la transformación territorial a partir de la producción metalúrgica en la región de El Oro y Tlalpujahua. Para este objetivo, se conjuntó los Sistemas de Información Geográfica en su orientación histórica, análisis espacial e investigación histórica, por la vasta información histórico-cartográfica con que cuenta la región. Planteamos que existe un déficit historiográfico en el uso de estas herramientas y cartografía histórica para el análisis espacial en la Nueva España y minería, en perspectiva histórica. El trabajo permitió conocer a diferentes escalas momentos de poblamiento, redes comerciales, vías de comunicación, toponimia e información geológica en periodos de bonanza; estas representaron variables que estructuraron el territorio.

Palabras clave: *cartografía histórica, SIG-Histórico, minería novohispana, región El Oro y Tlalpujahua.*

* Maestro en Geografía con énfasis en Manejo Integrado de Paisaje. Doctorante en Estudios Novohispanos, Universidad Autónoma de Zacatecas, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8397-4215>; correo: pgomez@pmip.unam.mx

** Doctor en Geografía. Profesor-investigador titular del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9626-0322>

Introducción

La minería novohispana ha sido ampliamente estudiada por su influencia en la transformación territorial, de la sociedad y del entorno económico de la época (Brading, 1975; Bakewell, 1976; 1991, Commons, 1989; Hausberger, 1997). De manera particular, en el periodo colonial tardío, el reformismo borbónico¹ dispuso una serie de cambios y medidas administrativas, tales como ajustes tributarios, mejoras en la recaudación fiscal, la creación del Real Tribunal de Minería², las Ordenanzas de Minería de 1783 —para el control minero desde la producción, el aprovechamiento en haciendas y distribución de los metales—, y nuevas técnicas de aprovechamiento metalúrgico —amalgamamiento con base en azogue³—, entre otros aspectos históricamente significativos (Pérez, 1991; Contreras, 1995). Con ello, la producción minera alcanzó cifras inconcebibles para la época; autores lo atribuyen al cambio tecnológico y la política de aprovechamiento, lo que dispuso diferentes cambios en la dinámica espacial a diferentes escalas (Trabulse, 1981; Sariego, 1994; Propin y Sánchez, 2001).

Por lo anterior, en este capítulo se presenta un estudio geográfico e histórico que analiza la relación de la minería y la organización territorial que tuvo lugar en la región minera de El Oro y Tlalpujahua, que comprende los actuales estados de México y Michoacán, respectivamente. El estudio se focaliza entre los siglos XVIII y XIX, en el contexto de las reformas borbónicas. Para ello, se recurre a fuentes primarias, específicamente cartografía histórica. Los mapas históricos se procesan espacialmente mediante el uso

¹ Las reformas estaban orientadas por una vocación fiscalista: rescatar el control de los impuestos, eliminar los arrendamientos y mejorando el sistema de recolección. Derivó, entre otros aspectos, en la creación de una nueva división territorial administrativo-política (las intendencias), mejoras en la administración fiscal a través de la Real Hacienda y otorgamiento de concesiones mineras y resolución de conflictos a través del Real Tribunal de Minería (Jauregui, 1999; Blanco y Romero, 2000).

² Institución de carácter gremial, la cual fungía como banco para inversiones mineras. Entre sus tareas estaba la asociación de mineros, administración de recursos monetarios y un consejero (Tamayo, 1943).

³ El azogue es mercurio utilizado para amalgamar la plata; es decir, su compactación. Fue el método de tratamiento de la plata durante gran parte de la época colonial. En 1618 bajo el decreto del rey, se proclamó que este mineral no debería faltar en la mina, ya que cesaría la producción (Lang, 1969).

de sistemas de información geográfica en su vertiente histórica (SIG-H). Esto se hace con la finalidad de analizar, de forma general, cómo la producción metalúrgica deriva en dinámicas y patrones espaciales particulares que brindan una estructura en escala regional a las actividades socioeconómicas del lugar, en la escala local.

En principio, con el fin de brindar un contexto, describimos cómo la minería se configuró en la Nueva España y cómo transformó territorial y económicamente a la Colonia. Nos interesa resaltar el establecimiento de nodos y redes de estructuración territorial que incentivaron la consolidación de asentamientos como reales de minas, vías de comunicación, como caminos reales y senderos de arrieros. Las regiones mineras se caracterizaron por el aprovechamiento de recursos locales, administración a través de las haciendas de beneficio, control de las vetas, plantas metalúrgicas, gastos santuarios, lo que detonó en una transformación sucinta del entorno. Por tanto, la minería se convirtió en la principal base económica y productiva del periodo novohispano. Con ello, regiones enteras, algunas despobladas, inhóspitas, inaccesibles y lejanas de centros de población se desarrollaron como regiones económicamente estables y prósperas (Sariego, 1994; Álvarez, 1999).

En este trabajo, entendemos la organización territorial por la minería como la articulación relacionada con la población y el espacio para la transformación, exportación y administración de la producción metalúrgica (López y Moncada, 2012). Como vemos, esto da lugar a prácticas espaciales específicas que fueron representadas en la cartografía histórica, pues a partir de su análisis e interpretación se pueden ver momentos de poblamiento, toponimia, vetas principales, la aparición de ranchos y estancias, fraccionamiento de haciendas, conformación de caminos, el nombramiento de conjuntos orográficos donde se extraían metales. Establecemos una aproximación a escala regional, pues en este espacio se desarrolló un sistema funcional compuesto por flujos, nodos e interacciones a partir de una actividad productiva (Propin y Sánchez, 2001). La delimitación de la región se hizo bajo dos principios. Primero, a partir de la geografía física, partiendo de la geomorfología donde se encontraban las minas; y segundo, dado por la actividad humana denotado por patrones de asentamiento y redes de intercambio. Al espacio le precede una construcción social e histórica con diferentes estructuras y subsistemas que rigen y controlan los recursos (García, 2008; Viales, 2010).

Planteamos que el análisis espacial en perspectiva histórica permite conocer patrones generales de cambio territorial que han sido poco abordados en la historiografía. La región de estudio cuenta con un notable legado cartográfico-histórico poco utilizado hasta el momento para analizar fenómenos espaciales a diferentes escalas. En la actualidad son pocos los trabajos de análisis espacial mediante SIG-histórico para el periodo novohispano (Sluyter, 1999; Hunter y Sluyter, 2011; Hunter, 2012).

En investigaciones para la Nueva España, la minería y la transformación espacial derivada de la actividad no es un tema central, pues la mayoría de éstas se han centrado en el cambio de uso de suelo, territorio y caminos, por mencionar algunos. Entre algunos trabajos más recientes podemos referir a Navarro (2023) que versa sobre apropiaciones territoriales y uso de la tierra relacionado con la frontera. Asimismo, trabajos como el de Murrieta (*et al.*, 2019) enfocan el SIG-histórico en la interpretación de un mapa del siglo XVI para estudiar información social, geográfica, de simbología, ideológica e identitaria en la transición de Mesoamérica al virreinato para el centro novohispano. A su vez, en el reparto de tierras y la introducción de campos agrícolas en el XVI como proceso de colonización, enfoques espaciales como el de Lefebvre (2018), exponen los principales cambios territoriales, momentos de reparto y el manejo de documentación administrativa con valiosa información.

Por ello, identificamos que el aprovechamiento de la cartografía histórica representa una oportunidad de reconocer fenómenos espaciales que han sido poco atendidos en el periodo novohispano. El uso de esta herramienta ha desempeñado un papel importante en el análisis de procesos históricos de forma interdisciplinaria, valiéndose de fuentes primarias para la representación espacial. Los mapas históricos pueden figurar, en diversos casos, como la única fuente de observar paisajes, escenas, territorio y espacio geográfico que ya no cuenta con sus características primarias (Gregory y Healey, 2007; Bailey y Schick, 2009; DeBeats y Gregory, 2011; Zohar, 2019).

Los mapas también son un instrumento para el razonamiento espacial de la información cuantitativa. Son una imagen, que a menudo ya no existe de ubicaciones y estadísticas; asimismo permite describir, explorar y comunicar algún aspecto de la realidad histórica (Harley, 1989). Representa a una realidad que facilita el conocimiento espacial de cosas, condiciones,

procesos y eventos. Por ello, en este capítulo consideramos al mapa como un elemento que contiene un código visual sujeto a esquemas de lectura, un medio para controlar y organizar datos que permiten la interpretación y construcción del pasado que, a su vez puede ser analizado histórica, geográfica, semántica, estética y discursivamente (Rojas, 2008; Lois, 2015).

Para este trabajo, se hizo una revisión de diversas metodologías y manejo de bases de datos, pues son necesarios algunos aportes para los SIG-históricos, modelos de regionalización, y cambios sociales con base en actividades productivas (Healey y Stamp, 2000; MacDonald y Black, 2000). Asimismo, fue necesario reconocer otro tipo de aproximaciones para el procesamiento de información documental y relaciones espaciales con visiones desde la geografía histórica. (Ellian y Gregory, 2001; Gregory y Healey, 2007; Bailey y Schick, 2009). En diversos estudios se han documentado transformaciones territoriales con estudios de caso aplicados a vías férreas, agricultura, conflictos sociales, religión, política, no obstante, son un marco de referencia para el objetivo de esta investigación, ya que pocos de estos estudios se han enfocado en la minería (DeBeats y Gregory, 2011; Gregory, 2014; Schindlling y Harris, 2018).

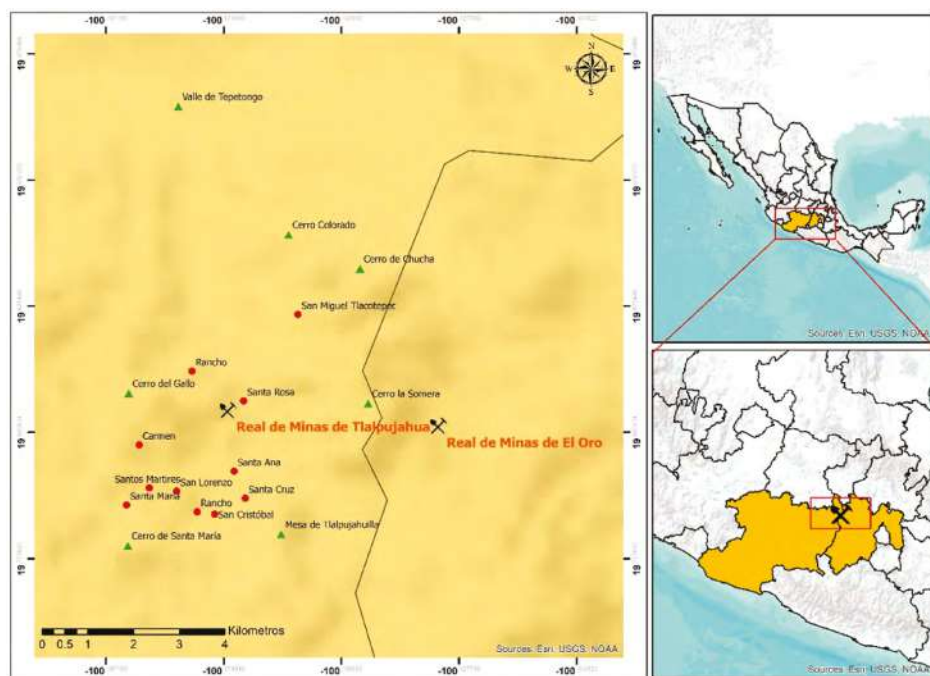
Para atender lo anterior dispuesto, el capítulo se estructura de la siguiente manera: primero ofrecemos un panorama histórico sobre la fundación de los Reales de Minas de El Oro y Tlalpujahua, los diferentes momentos de producción, población y empresas. Segundo, se explica a grandes rasgos la metodología empleada y los elementos que conformaron el SIG-histórico. Y tercero, se explica en análisis espacial con las fuentes primarias utilizadas, los elementos cartográficos, la articulación territorial planteada y, finalmente una serie de conclusiones respecto a lo observado espacialmente.

La región El Oro y Tlalpujahua, un enclave minero novohispano

La historia de la región comienza en el poblado de Tlalpujahua, provincia de Michoacán, cuando el conquistador Hernán Cortés otorgó la primera encomienda a Gonzalo Rioboz Sotomayor, encargado de los pueblos de Araro y Zinapécuaro. Hacia 1525, junto con Zumpango, Sultepec, entre otros pueblos. Tlalpujahua fue de los primeros laboríos argentíferos en el

occidente novohispano. En 1558 fueron descubiertas las minas con los límites de Taimeo bajo la jurisdicción de Ucareo, Cinapécuaro, Araro, Maravatío y Taximaroa (Gerhard, 1993). En 1560 recibió el título de Real de Minas de Tlalpujahuá en Ucareo. Fue en 1596 que el alcalde Gaspar de Solís, llevó a cabo la primera congregación de indígenas y el primer trazo y construcción de viviendas para el nuevo pueblo (figura 1). En 1603 se reconoció de manera independiente el Real de Minas de Tlalpujahuá con catorce vetas en explotación, extendiéndose su bonanza a mediados del siglo XVII (Lang, 1977; Aparicio y Poncela, 2019).

Figura 1. Mapa de ubicación de los Real de Minas de El Oro y Real de Minas de Tlalpujahuá con división política actual

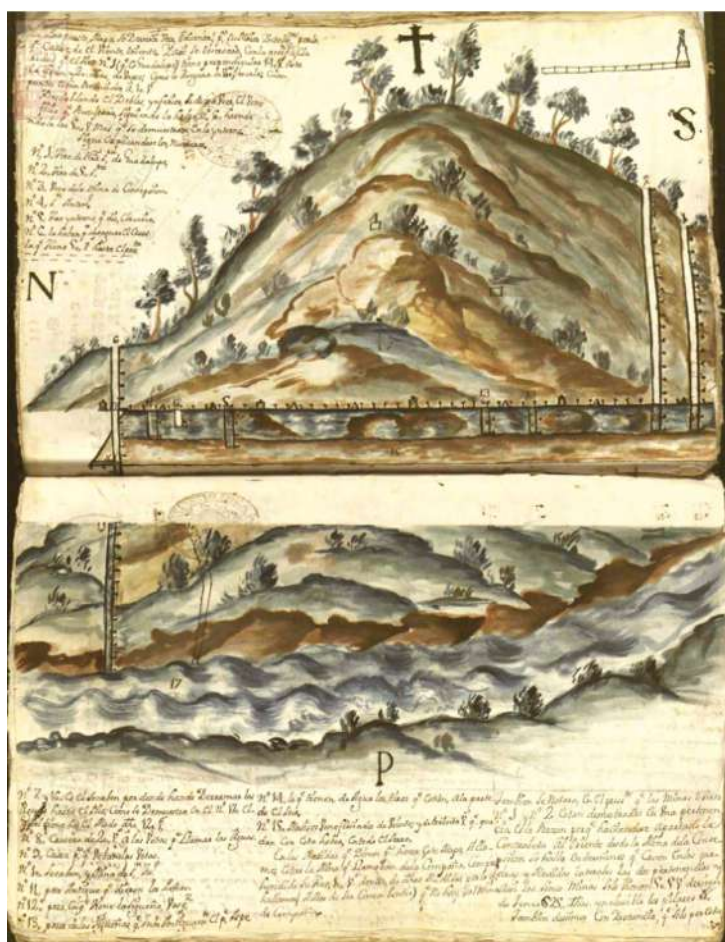


Fuente: elaboración propia.

Si bien la historia de la región minera se remonta a principios de la etapa colonial, en este estudio nos centramos en la segunda bonanza argentífera de Tlalpujahuá, que data de 1733, pues es el año que marca el descubrimiento de nuevas minas. En este lapso proliferaron solicitudes, litigios y

proyectos de aprovechamiento metalúrgico que, consecuentemente, transformaron la organización territorial (figura 2). En 1736 inició la explotación de la mina de Santa Ana y para 1743, el minero José de la Borda encontró otra rica veta; sin embargo, éste se trasladó a Taxco ocho años después. En 1745 se construyó la hacienda de beneficio de Los Reyes. En 1758 corresponde al año de mayor producción minera que se registró en la Caja Real de México, procedente de Tlalpujahua (Gavira, 2006).

Figura 2. Minas de Tlalpujahua, Michoacán, 1733



Fuente: Archivo General de la Nación, procedente de Minería, vol. 20, exp. 10, fojas, 336 y 337. MAPILU 02746F.

La temporalidad planteada se orienta en el aprovechamiento de las primeras minas en la localidad de El Oro, las cuales fueron descubiertas por Andrés Francisco Arziniega, por lo que en 1786 se inauguró el Real de Minas de El Oro, en las faldas del cerro de La Somera, perteneciente a la jurisdicción de Ixtlahuaca. Sin embargo, Arziniega comenzó a beneficiarse de los productos minerales en 1788. Durante este año se establecieron en la región otras minas, primero la del Poder de Dios, administrada por Vicente Gujide y las de menores rendimientos de San Francisco de Paula, San Vicente, De la Aparición y Chihuahua, cuyos respectivos propietarios eran Manuel Serrano, José González y José Coronado (Meléndez, 2013).

En El Oro, las principales vetas de aprovechamiento en la época de estudio fueron, Chihuahua, Acacio, La Descubridora, San Rafael y Calera. Entre los yacimientos más importantes se encuentran la ya mencionada Poder de Dios, San Francisco de Paula, San Vicente, de la Aparición y Sacramento. Los minerales extraídos fueron oro nativo, plata nativa, plata sulfúrea, plata gris, polvorilla de plata, manganeso, cuarzo y pirita (Meléndez, 2013). Nuestra investigación se desarrolla hasta el siglo XIX, pues hasta este tiempo es que se aprovecharon los filones más ricos conocidos hasta ese entonces en el país. Una de las empresas prolíferas fue la compañía minera Dos Estrellas, que significó un importante aporte técnico, auspiciando a la región como una de las más importantes del centro del país (Uribe, 2009). Durante este lapso otras empresas internacionales realizaron explotaciones, entre ellas se encuentran, Esperanza Ltd., de origen inglés (1893), Guggenheim Exploration, de origen estadounidense (1897); Weetman Pearson, de capital inglés (1897); Compañía Minera Las Dos Estrellas, de capital francés (1898); American Mining Company y American Railroad and Lumber Company, —que posteriormente se convertiría en The Oro Mining Railway Company— de capital inglés (1899) y The exploration company, de capital inglés, las cuales invirtieron para la rehabilitación de minas destruidas o en desuso (Uribe, 2005).

Procedimiento metodológico

Para la investigación se elaboró una base de datos cartográficos que constó de los siguientes criterios de selección: primero, la temporalidad debía co-

responder al periodo de estudio, entre los siglos XVIII y XIX, privilegiando los mapas que correspondían a la actividad minera en la región. Segundo, el mapa podría representar algún tipo de propiedad de la tierra, que tuviera una escala local-regional y que contuviera algún informe de producción minera. La búsqueda de estos insumos se realizó en los archivos históricos municipales de El Oro y Tlalpujahua, el Archivo General de la Nación en el fondo Mapas Planos e Ilustraciones, en los fondos Operaciones de Guerra, Tierras y Minería, así como la Mapoteca Manuel Orozco y Berra.

En total se encontraron 32 mapas que cumplieron con las características antes mencionadas; sin embargo, se seleccionaron 14 para el proceso en SIG-histórico descrito más adelante⁴. Los mapas históricos elegidos corresponden a triangulaciones mineras⁵ (Triangulación de los distritos el Oro y Tlalpujahua, de El Oro, Red Triangular entre Acambay y El Oro, Estado de México, Triangulación Acambay a Mineral del Oro, Triangulación de primer y segundo orden en la región megaséismica Acambay Temascalcingo, distrito de El Oro, Estado de México, los cuales corresponden a finales siglo XIX;), planos de haciendas (San Miguel Solís, Temascalcingo), plano geológico de minería (elaborado por José Burkart en 1828 para el distrito El Oro y Tlalpujahua), y mapa de solicitud de tierras (Tlalpujahua, Michoacán, Ixtlahuaca y Jilotepec. Edo. Méx. 1755).

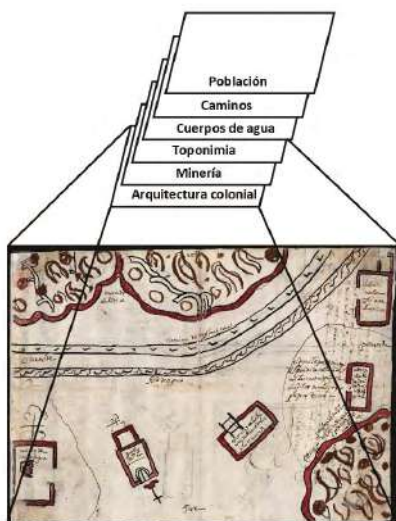
Tal como señala Guzmán, (2017), las metodologías en SIG-histórico radican en el uso de herramientas espaciales para responder preguntas de investigación sobre fenómenos históricos de forma innovadora. Las capas de información extraídas, producto de la interpretación cartográfica, tratan de responder (figura 3), ¿cómo se estructuró el territorio a partir de la minería? ¿Qué información del espacio nos otorgan los mapas? ¿Qué flujos y dinámicas regionales dan cuenta de la realidad minera de la zona de estudio? ¿Qué pueblos y localidades fueron apareciendo? ¿Qué periodos fueron determinantes para la expansión minera? ¿Los cambios en el territorio, son sólo por la minería? ¿Qué procesos históricos fueron determinantes en los

⁴ Los mapas históricos no elegidos sirvieron de referencia en el proceso de interpretación que resultó complejo su procesamiento en SIG-histórico.

⁵ Técnica cartográfica utilizada para señalar la distancia más corta entre algún poblado o mina. Esta tecnología cartográfica se implementó a finales del siglo XIX y consideraba la superficie del suelo. Las distancias se identificaban por puntos fijos. (Gil, 2012).

procesos espaciales? De igual forma, alguna parte de esta información fue cotejada en fuentes primarias como informes de minería, expedientes de los mapas, e información de litigios.

Figura 3. Capas de información obtenidas a partir de mapa histórico, con base en la metodología de MacDonald y Black (2000)



Fuente: Minas de Tlalpujahuá, Gaspar de Solís, 1591. AGN, Procede de tierras, vol. 2721, exp. 25, f. 263.

Cabe mencionar que en el caso de las toponimias estas pudieron haber cambiado, o bien, estar próximos a otros lugares que no corresponden a los que se registraron, por ende, los registros espaciales se correlacionaron con la información histórica, con la finalidad de detectar inexactitudes, exageración o discrepancia de los datos (Schindling y Harris, 2018; Zohar, 2019). El SIG-histórico tiene 3 componentes clave (Gregory *et al.*, 2001): un conjunto de datos, información temática sobre el objeto de estudio e información espacial.

El análisis espacial

La cartografía histórica consultada fue una oportunidad de conocimiento del territorio a diferentes escalas y momentos de producción del recurso

mineral. Como se ha mencionado en el apartado anterior, los mapas estudiados devienen de litigios, linderos, fronteras, levantamientos topográficos y geodésicos, triangulaciones megasísmicas para distancias, fraccionamiento y demarcaciones de haciendas, aprovechamientos agrícolas e información militar. Las capas generadas indican un conocimiento amplio del espacio por los intereses de aprovechamiento, lo que se ve expresado en ranchos, estancias, haciendas, toponimia, infraestructura defensiva y eclesiástica, localidades, vías de comunicación, entre otros. Esta información espacial se complementa con diversos informes de minería que nos permiten una interpretación histórica y geográfica más precisa respecto al lugar. Los patrones y la visualización cartográfica otorgan mayor claridad para dilucidar dinámicas regionales, flujos mercantiles, vínculos geográficos y el funcionamiento del sistema metalúrgico.

Hay que considerar que los momentos de aprovechamiento se pueden denotar por aumentos en la población, producción en marcos e impuestos, por ejemplo, para el caso específico de Tlalpujahua, pocos son los trabajos que involucran estas variables. En principio, en 1729 don José de la Borda fue el encargado de la exploración y puesta en marcha de antiguos laboríos, para que en 1733 se consolidaran los tiros de las minas de la Concepción y Guadalupe, que significaron un repunte en los aprovechamientos (Almazán y Santiago, 2020). Esta bonanza se extendió poco más de dos décadas, pues en 1745 derivó en la construcción de la hacienda de Reyes para el amalgamamiento de la plata. En 1746 la población local sumaba 5 470 habitantes. De forma aparente no se incrementó mucho, ya que para 1769 en Tlalpujahua habitaban 5 276 personas; sin embargo, para un repunte a final de siglo indica que en 1793 se establecieron 9 888 personas. Por otro lado, datos señalan que, hasta antes de 1750, los costos de explotación y la extracción de una menor cantidad de plata hicieron que De la Borda se trasladara a Taxco en 1748, y en 1758 abrió una nueva empresa minera en Chontalpa y Zacualpan; por ende, este momento es clave para que la población de Tlalpujahua se mantuviera lineal (Gavira, 2006).

Durante este periodo de bonanza hay tres aspectos a destacar: primero, las reformas borbónicas redujeron impuestos de un 26% al 13% sobre la producción; hubo una disminución del 50% en el costo del mercurio para el amalgamamiento y se crearon las diputaciones mineras, y la exención de los

derechos de alcabala. Segundo, la Corona ordenó el apoyo a los trece distritos mineros más importantes de la Nueva España, entre ellos Tlalpujahua, por los hermanos de “La Borda”, quienes también laboraron las minas de Taxco (Trabulse, 1981). Tercero, de acuerdo el estudio de Lang (1977), las minas de Tlalpujahua eran susceptibles a ser aprovechadas mediante nuevos métodos de amalgamiento; por ejemplo, el de Born, que fueron desplazando al método de “patio”. De igual forma, los aportes científicos de españoles, franceses y alemanes, sirvieron para las mejoras de beneficio de la plata. La minería dependía necesariamente del mercurio y justo a mediados del siglo XVIII es cuando se tiene recuento del mayor aprovisionamiento del mineral (Pelayo, 1990).

La mayor parte de la población en la región se dedicaba al comercio de productos agrícolas y ganaderos, especialmente de trigo, maíz, cebada y animales de carga para los trabajadores de la mina. Para el caso de Tlalpujahua, José de la Borda entregaba una doceava porción del mineral extraído a los empleados, aunado a su salario (Povea, 2018). De acuerdo con información de los asentamientos que provienen de estadísticas elaboradas en 1758, se dividían de la siguiente manera: cabecera (Real de Tlalpujahua); barrios (El Real, Puztla, Bartola, Zapatero, Real de Arriba); pueblos (Tlaco-tepec, Los Remedios, Tarimangacho, Tlalpujahuilla, Santa María), y cuadrillas (San Lorenzo, San Francisco, Magallanes, Todos Santos), los cuales se inscriben en la cartografía presentada más adelante (Gavira, 2006).

En esta coyuntura, el repunte en las últimas décadas del siglo XVIII tuvo otras condicionantes. En 1772 se fundó el Real Colegio de Minería donde se impartieron cursos de metalurgia, mineralogía y química. Además, en 1777 se creó el Real Tribunal de Minería auspiciado por Joaquín Vázquez de León, que tenía como meta lograr mejoras tecnológicas para la metalurgia, resolver con prontitud los litigios y demandas, y otorgar créditos y negociación de minas (Velasco, 1987; Commons, 1989). En general, se impulsó una modernización del sistema colonial y un crecimiento comercial sin precedentes. Precisamente la década de 1770 marcó un hito en la producción argentífera, ya que hubo una expansión industrial. Se calcula que la Nueva España en este periodo producía el 67% de toda la plata de América (Brading, 1975). En este contexto, en 1786 se fundó el Real de Minas de El Oro, por lo que la región se consolidó para ambos Reales (Brading, 1975).

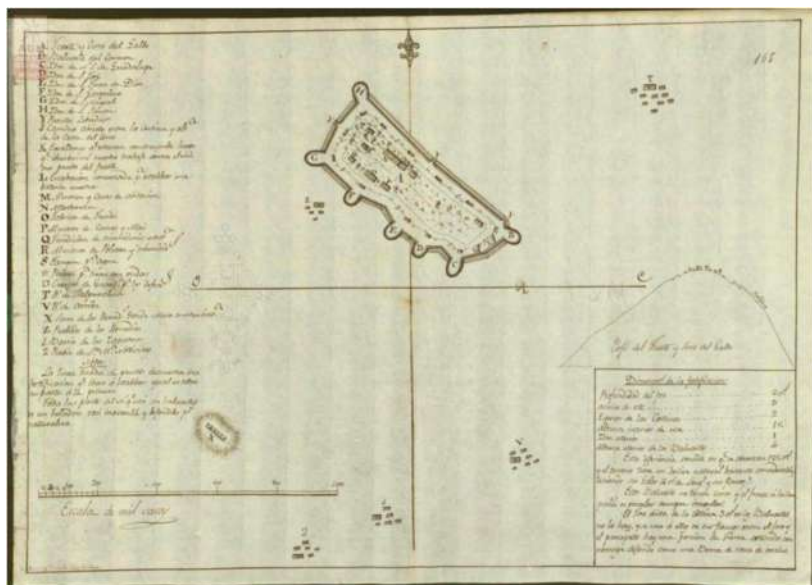
De acuerdo con el informe de la mina de San Buenaventura, en Tlalpujahua, elaborado por Emilio Schleiden (1856), el periodo de esta segunda bonanza culminó por las siguientes causas:

Se ignora, como algunas veces, la verdadera causa de haber terminado la bonanza, pero es de presumir que las dificultades del desagüe, la que presentaba la blandura de los respaldos y la falta de medios para vencer estos y otros inconvenientes, paralizaran los trabajos [...] Entre varias tentativas de rehabilitación del mineral, la más notable fue la que hizo D. Joaquín Velázquez de León, director del Tribunal de Minería, quien con fondos del banco emprendió el desagüe de algunas minas de la veta de Coronas. No realizó su objeto, pero sirvió de un poderoso estímulo a esta clase de empresas. [...] Bien que la mayor parte es de creer dimanaba del mineral del Oro, pues en Tlalpujahua lo que más se hacía, según parece, era despilar los altos y repepenar les terreros. Pero de aquellas obras nos interesa una, por hallarse dentro de la pertenencia de San Buenaventura, y es el tiro, llamado de la Caja de agua, que está por concluir y se empezó poco antes de la Guerra de Independencia.

Precisamente, tras la Guerra de Independencia los laboríos quedaron desolados, sin embargo, la cartografía militar nos da indicios relevantes para comprender el territorio. Sobre el cerro del Gallo, en Tlalpujahua, se construyó una fortificación, diseñada por Nicolás Cano Luque, quien denominó al baluarte principal como El Carmen. Es de llamar la atención que este fuerte es de los pocos de la llamada ruta a Tierra Adentro, pues la mayor parte se edificó en zonas portuarias como Campeche, Bacalar, San Juan de Ulúa, Acapulco, por mencionar algunos. Ello resalta la importancia política y económica de este sitio. Esta infraestructura se compone de muros en forma de pentágonos o hexágonos. Se colocan en el frente de la fortificación para tener visión general de los terrenos en custodia y tener almacenes para provisiones en general. En la figura 3 se aprecia el baluarte de El Carmen, el cual se encuentra en esa ubicación ya que “al norte presenta un voladero casi inaccesible y con presencia de naturaleza”, como detalla el mapa. El fuerte del Cerro del Gallo fue construido para la Guerra de Independencia. En 1812, en la fortaleza se establecieron los hermanos López Rayón, Ignacio

y Francisco, quienes fueron los precursores del movimiento. La fortaleza tuvo la función de fabricar y albergar fusiles, cañones, establecimiento de tropas e imprenta. En 1813, los insurgentes obligaron a las tropas realistas a abandonar el Cerro del Gallo (Gorbea, 1968).

Figura 4. Plano del Fuerte del Cerro del Gallo, Tlalpujahua, Michoacán, 1813. Elaborado por Nicolás Cano de Luque



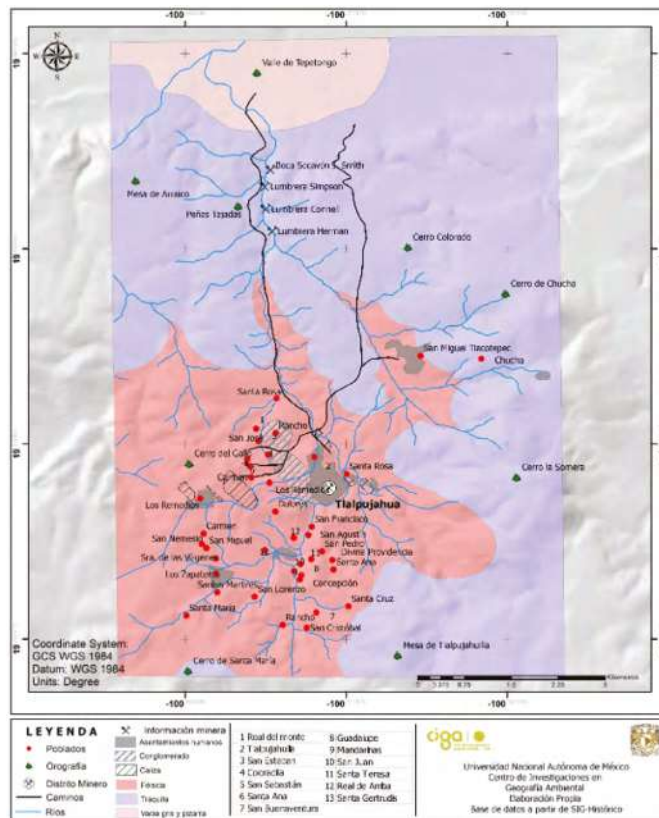
Fuente: Archivo General de la Nación, Operaciones de Guerra, vol. 112, f. 165. MAPILU 02628F.

De manera particular, los mapas militares expresan ocupación territorial y aluden a la importancia estratégica del lugar y al interés político por defenderlo. Los conocimientos geográficos y cartográficos respaldaron la organización del territorio. Esto se debe a que los poblados representados están en dirección a los baluartes, en modo de contraataque (Moncada, 2018).

Posterior a la Guerra de Independencia, la relativa estabilidad política también fue factor para aprovechamientos argentíferos. En Tlalpujahua se instaló el ayuntamiento independiente en 1822 y en 1831 se le reconoció como municipio (Uribe, 2001). En este lapso, la inversión extranjera se hizo presente para un repunte argentífero. Dentro de una de las generaciones prolíferas de ingenieros y científicos germanos se encuentra Joseph Burkart, quien fun-

gió como director técnico de la Compañía Británica de Tlalpujahua de 1825 a 1828 (Suter, 2016). La rehabilitación consistió en el desagüe de minas conocidas, la introducción de motores de vapor y la mejora en los sistemas de beneficio. La cartografía desarrollada por Burkart permite identificar de manera amplia la geografía, mineralogía, geología y orografía del sitio de estudio. Desarrolló el plano geológico del distrito minero de Tlalpujahua y El Oro, y que sirvió de base para la construcción del SIG-histórico, específicamente el mapa de la figura 5, pues contiene curvas de nivel que precisan la geomorfología de la zona, asimismo la condición litológica y otros elementos geográficos como escorrentías, localidades y vetas de minerales (Uribe, 2014).

Figura 5. Plano del distrito minero, con información geográfica y geológica, a partir de mapa geológico del distrito minería de Tlalpujahua, 1828, elaborado por José Burkart



Fuente: Mapoteca Manuel Orozco y Berra. CGF.RM.M26.V4.0243

Este periodo del mapa corresponde a la segunda bonanza del distrito minero, es decir, cuando estuvieron a la par las labores de El Oro y Tlalpujahua. La tecnología implantada por Burkart fue fundamental para los aprovechamientos (Corona y Uribe, 2009); en la siguiente descripción que ofrece Schleiden (1856:8) se indica cómo los aprovechamientos fueron a lo largo de vetas novohispanas, asimismo, la composición litológica:

Tal era el estado en que se hallaban las minas de Tlalpujahua, cuando vino a darles nueva vida la compañía grande del Oro, que fundándose en tradiciones y otros datos, parece discurrir de esta manera [...] Se compone de melafíra, extendida por el rumbo del cerro de Somera. Inicia el de San Lorenzo, divide en dos partes un gran terreno de pizarra de transición, con bacía gris y caliza. La parte más pequeña al oriente, compone el mineral del Oro, y el de Tlalpujahua la más grande al poniente.

Los adelantos científicos fueron clave para el desarrollo de cartografía especializada y una mejora considerable en los métodos de uso del mercurio que, si bien esta técnica se empleó en la Nueva España desde el siglo XVI, es a finales del siglo XVIII y principios del XIX que los especialistas la llevaron a un mejoramiento sustancial a Europa (Lang, 1977). De igual forma, las descripciones geológicas como la de la figura 4 fueron esenciales para la extracción de los metales, pues los científicos tenían la experiencia y el conocimiento sobre las antiguas minas novohispanas y los errores de su funcionamiento. Además, los análisis económicos sirvieron para la toma de decisiones en torno a si eran factibles o no las exploraciones. La obra de Burkart de las minas de Tlalpujahua y su descripción geológica fue publicada en 1866 en el *Boletín de la Sociedad de Geografía y Estadística de la República Mexicana*, por lo que el informe de Schleiden (1856: 11) identifica la necesidad de estos avances para abaratar costos:

Aunque por la considerable extensión del terreno, era necesario mucho tiempo y estudio para la formación de un mapa geológico en que se comprendiese todo él, sería increíble que hubiesen dejado de formarle las tres poderosas compañías que han trabajado desde 1825 hasta hoy, a no saberse que la guía principal para las obras subterráneas fue la tradición. El mapa, con toda probabilidad, hubiera, ahorrado algunos millares de pesos.

La estancia de Burkart en Tlalpujahua fue de alrededor de nueve años, donde consolidó el distrito que estaba desolado y en ruinas. Destaca en su informe cómo la rehabilitación de las vetas hizo que la población volviera al pueblo a las faldas del Cerro del Gallo, el cual gozaba de abundantes maderas para la construcción y fortificación de las minas. Los pueblos mostrados en la cartografía ya se encontraban antes de la llegada de esta nueva bonanza; la mayoría de éstos y los ranchos tuvieron un uso de suelo agrícola tras la Guerra de Independencia. La población respecto a finales del periodo colonial no aumentó en demasía, pues para 1822 alcanzaba los 12 000 habitantes, casi 4 000 más que a finales del siglo XVIII. Los minerales extraídos fueron la plata sulfúrea o plata azul, la plata agria o azul acerada. No obstante, esta bonanza no se postergó, ya que en 1827 comenzó a tener problemas y fue en este año que el director de la compañía fue removido, ya que como señala el informe no tenía los conocimientos necesarios para la minería y no supo manejar las 400 000 libras de inversión londinense —una cifra trascendental para la época—. En 1828, la empresa británica dio la orden de suspender labores, por lo que los aprovechamientos posteriores se hacían en pequeñas vetas (Burkart, 1866).

La última bonanza del distrito minero llegó en 1786. Posteriormente, en 1857, las reformas liberales se instauraron en el país y repercutieron en la minería, mediante la instauración de políticas fiscales que regularon los impuestos en la materia (Carmagnani, 1989). El gobierno federal realizó inventarios y estadísticas de aprovechamientos mineros. Posteriormente, en el régimen porfirista se descubrieron y aprovecharon las vetas del cerro la Somera, en El Oro. En 1898 se fundó la compañía minera Las dos Estrellas. La concesión federal se otorgó para los tiros Estrella 1, Estrella 2 y Estrella 3, que abarcaron un área de 385.37 hectáreas. La minera propició un desarrollo técnico, científico y productivo. Las empresas inglesas modernizaron la industria, invirtieron capital, lograron que se ubicara entre las 22 más rentables en México (Corona y Uribe, 2001). Influyó además que la demanda de oro a nivel mundial se encontraba en apogeo. Desde 1898 a 1907 alrededor de 51 empresas explotaron minerales, la mayor participación fue el capital inglés; sin embargo, el capital norteamericano y francés fueron los de mayor alcance (Uribe 2001: Meléndez, 2013).

Durante este periodo, se desarrolló cartografía específica, en particular, otra fuente valiosa de información son los mapas de triangulacio-

nes de regiones megasísmicas. Las triangulaciones básicamente se utilizaban para señalar la distancia más corta entre algún poblado o mina. Esta producción cartográfica se implementó a finales del siglo XIX. Si bien estos mapas fungían para distancias, contaban con excelente información como topónimos orográficos, cuerpos de agua y localidades, los cuales pudieron ser mapeados (Gil, 2012). En este sentido, la figura 5 es un mapa que muestra la región de estudio con poco más de ochenta topónimos orográficos registrados entre 1755 y 1913.⁶ Este SIG-histórico precisa cómo la región de interés minero se expandió en más de un siglo de acuerdo con momentos de bonanza. Si bien los topónimos no identifican patrones de poblamiento, sí es una fuente de información para modelos de exploración, historia local y articulación territorial. Además, alberga un conjunto de datos históricos para otras investigaciones. Los topónimos significaron una fuente de información para orientación espacial producto de la interpretación cartográfica (Chloupek, 2018).

Los topónimos encontrados son producto de las investigaciones y levantamientos topográficos para el aprovechamiento argentífero; por lo tanto, dan cuenta de la realidad en la transformación no sólo del espacio físico, sino cómo los periodos de bonanza permitieron tener información de elementos territoriales a escala regional. De igual forma, se considera que el SIG-histórico planteado es una oportunidad para investigaciones futuras, ya que la información toponímica puede revelar aspectos lingüísticos, cambios poblacionales, conocimiento a escala local, sitios representativos culturales y de identidad histórica que no son objeto de esta investigación. Por ende, son necesarios enfoques interdisciplinarios para el análisis espacial aquí dispuesto (Tucci, *et al.*, 2011). La toponimia mostrada debe trabajarse con sumo cuidado, pues la historia de asentamientos y nombramiento de lugares es un proceso dinámico. Por ende, se hace hincapié en que la presencia de estos nombres corresponde a un tiempo y espacio determinado, ya que algunos pudieron haber cambiado de nombre (Levin, *et al.*, 2010).

Otro punto importante dentro de esta información es que los mapas históricos de los cuales se conformó el SIG es que pueden contener conocimiento que no se encuentra en otras fuentes primarias, como expedientes,

⁶ Se decidió usar un mapa de principios del siglo XX, ya que contenía información más precisa de topónimos encontrados en cartografía anterior a esta fecha.

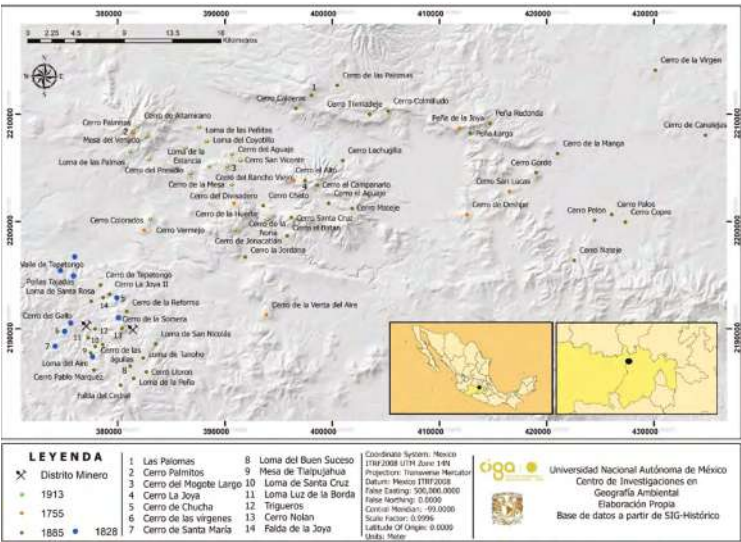
informes o archivos gubernamentales. También, la información contenida en diversos mapas históricos, ahora se encuentra reunida en una misma base de datos, por lo que abre un panorama a identificar otro tipo de patrones y percepciones del espacio en cuestión. Asimismo, la información sobre la localización de puntos específicos tiene mayor precisión en la cartografía. Los mapas utilizados en el presente estudio dan cuenta de cambios tecnológicos, uso de herramientas topográficas, diferentes avances en la medición de la escala y exactitud de su representación. No obstante, más allá del tratamiento en el SIG, lo sustancial es la interpretación de los mapas y en su caso, la de fuentes primarias anexas (Rumsey y Williams, 2002).

Los mapas resultantes del SIG-histórico intentan mostrar una condición geográfica en cuanto a los elementos que lo componen. Hay que tomar en cuenta dentro de los mapas históricos de las múltiples distensiones, restricciones y subjetividad que le preceden. Estas circunstancias tratan de ser resueltas para que puedan ser comprendidas en convenciones geográficas contemporáneas. Las series espacio-temporales propuestas se pueden actualizar con nuevos datos, o correcciones necesarias.

Las ambigüedades se pueden resolver con investigación histórica a profundidad, pues las representaciones en el pasado es una forma de percibir el espacio físico y la forma en que se construye o se quiere indicar el medio discursivo de la cartografía histórica. La visión multiescalar propuesta da cuenta de ciertas condiciones espaciales de la región, se puede observar la necesidad de quienes poblaron esa región de conocer su espacio, sus formaciones geológicas, la contención de riesgos, la necesidad de poblados para la mano de obra y tomar en cuenta dónde se encontraban los recursos, especialmente metalúrgicos (Desimini, 2019; Cattoor, 2019).

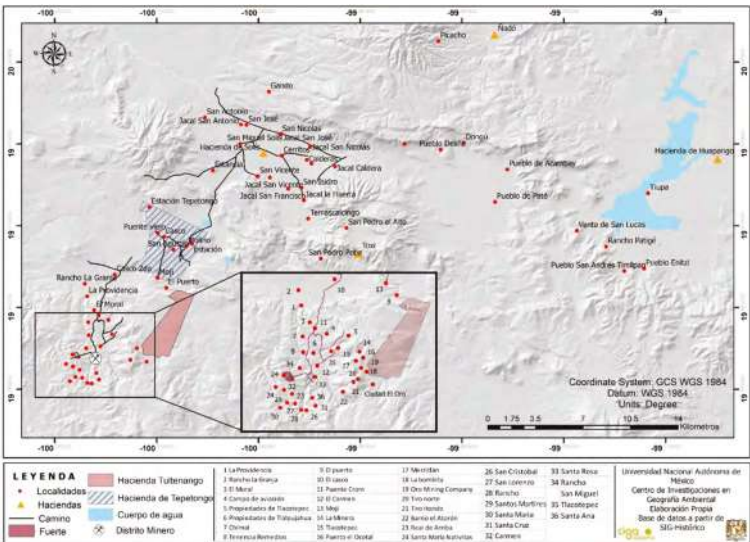
La cartografía histórica no sólo se elaboró para el conocimiento y aprovechamiento de la mina, sino de sus provisiones, pues buena parte de los sitios encontrados en los mapas no corresponden únicamente a vetas, desagües y tiros. Los mapas consultados para la investigación contienen información sobre haciendas, ranchos, localidades, estancias y vías de comunicación, por lo que en el mapa de la figura 6, se decidió conjuntar estos elementos siguiendo el principio de diferentes temporalidades, pues es importante, reconocer cómo en la cartografía algunos sitios aparecen, y demuestra el conocimiento espacial de la región en el mismo patrón

Figura 6. Mapa de topónimos orográficos desde 1755 a 1913 para la región minera El Oro-Tlalpujahua.



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Mapa de localidades, ranchos y haciendas desde 1755 a 1913 para la región minera El Oro-Tlalpujahua



Fuente: elaboración propia.

regional de poblamiento. Este último mapa refleja un conjunto de acciones de forma secundaria vinculadas a la minería, pues las localidades formaron parte del comercio local, los principales centros administrativos y tributarios, lo que da cuenta de la amplia articulación territorial producto de la minería. Esta visión espacial es una aproximación a la dinámica minera, pues en realidad poco se ha escrito de relaciones topográficas y los asentamientos humanos en las minas, las bonanzas y los cambios en el espacio. Al ser una aproximación, en futuras investigaciones se recomienda otro tipo de fuentes primarias, como informes de visitantes coloniales, relatos de viajeros, informes de administradores, registros topográficos o itinerarios, sólo por mencionar algunos ejemplos (Stangl, 2019).

Para la elaboración del SIG-histórico de este mapa de la figura 6 hay que hacer unas precisiones. La temporalidad corresponde al periodo en que los elementos geográficos fueron encontrados en la cartografía histórica; se toma en cuenta que algunos poblados cambiaron de nombre, por lo que fueron actualizados a las bases más recientes —sobre todo mapas de 1885 y 1913, y poblados que aparecieron en 1755—, por ende, se decidió no separar las capas cronológicamente. Para el caso de las haciendas, en algunos casos la cartografía sólo marcó la ubicación del casco, pero como se observa, algunos más precisos de finales del siglo XIX se pudieron obtener sus límites. Para la zona de mayor actividad metalúrgica, gracias a los reconocimientos mineros y algunos mapas de las compañías mineras se lograron obtener las poblaciones. La otra parte de la región, las localidades se obtuvieron a partir de las triangulaciones megasísmicas.

Conclusiones

Consideramos que este estudio aporta al conocimiento espacial de una región minera en la historia espacial de más de un siglo. La cartografía de mediados del siglo de XVIII es poco precisa —en términos de las convenciones cartográficas actuales—. El SIG-histórico busca restar esa ambigüedad de sitios espacio-temporales a fin de tener una base de datos precisa, de tal forma que se puedan espacializar y comprender bajo otras perspectivas, los fenómenos históricos. Al ser un estudio que ofrece un marco general, es

conveniente que estas bases de datos sean utilizadas por futuros trabajos, pues es fundamental vincular ejercicios interdisciplinarios para comprender atributos históricos y unidades espaciales.

Más allá del uso de las herramientas del SIG-histórico, es conveniente una interpretación cartográfica y lectura de fuentes primarias anexas, pues como se mostró, se puede conocer informes de minería, geología y descripciones geográficas, a fin de conformar mapas con precisión. Los referentes y patrones encontrados en la cartografía muestran la historia minera de la región, pues es clave saber cómo las localidades se concentran en principio por las vetas, posteriormente algunas más dispersas sobre las haciendas, que alcanzan escalas más pequeñas. Se encontraron los elementos que permitieron suponer un auge minero como poblados, haciendas, ranchos, estancias, caminos, topónimos orográficos (cerros donde se llevaba la explotación minera), cuerpos de agua, ríos y vías de comunicación.

En conjunto con esta visión espacial, la información de fuentes primarias permitió cotejar los procesos de bonanza, cambios tecnológicos, abandono de minas, periodos bélicos, zonas de intercambio y procesos de poblamiento, en donde hay un punto en común: la actividad minera como medio de articulación y transformación del territorio. Por tanto, el Real de Minas de El Oro y Tlalpujahua fungió como una importante zona de estructuración regional. Permitió la creación de haciendas, dinamizó la economía con el descubrimiento de vetas de oro y plata, atrajo inversión y promovió el desarrollo de infraestructura. Consideramos que se conformó una importante base de datos sobre todos estos elementos,

Se considera que este estudio es una aproximación a lógicas y dinámicas territoriales, sin embargo, planteamos que es un avance necesario y pertinente para reconstrucciones, análisis paisajísticos y territoriales. Lo relevante es la expresión de datos y eventos históricos en un mapa, pues ello, permite analizar la historia regional con sus entidades geográficas.

Referencias

Almazán, A., y Santiago, P., (2020). "El resurgimiento del fénix", José de la Borda y sus últimas empresas mineras (1767-1778). En Salazar, N., Paniagua, J., Pérez, J., y Arcie-

- Ilo, D., (coords.), *El Jardín de las Hespérides: estudios sobre la plata en Iberoamérica. Siglos XVI al XIX* (pp. 95-109). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Aparicio, A., y Poncela, A., (2019). Tlalpujahua, Michoacán. De asentamiento minero a turístico. *URBS. Revista de Estudios Urbanos y Ciencias Sociales*, 9(2), 83-95.
- Álvarez, S. (1999). Colonización agrícola y colonización minera, la región de Chihuahua durante la primera mitad del siglo XVIII. *Relaciones*, 79(20), 29-82.
- Bailey, T., y Schick, J. (2009). Historical GIS: enabling the collision of history and geography. *Social Science Computer Review*, 27(3), 291-296.
- Bakewell, P. (1976). *Minería y sociedad en el México colonial: Zacatecas 1546-1700*. Fondo de Cultura Económica.
- Bakewell, P. (1991). La periodización de la producción minera en el norte de la Nueva España durante la época colonial. *Estudios de historia novohispana*, 10(10), 32-43.
- Blanco, M., y Romero, M. (2000). Los límites institucionales del crecimiento económico. Avances y retrocesos de la política borbónica en el siglo XVIII novohispano. *Investigación económica*, 60(231), 139-179.
- Brading, D. (1975). *Mineros y comerciantes en el México borbónico (1763-1810)*. Fondo de Cultura Económica.
- Burkart, J. (1866). *Descripción del Distrito de Minas de Tlalpujahua y de su constitución geológica con un mapa anexo*. Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía.
- Carmagnani, M. (1989). El liberalismo, los impuestos internos y el Estado federal mexicano 1857-1911. *Historia Mexicana*, 3(38), 471-496.
- Cattoor, B. (2019). Mapping and Design as Interrelated Processes Constructing Space-Time Narratives. En Coomans, T., Cattoor, B., y De Jonge, K. (eds.), *Mapping Landscapes in Transformation Multidisciplinary Methods for Historical Analysis* (pp. 63-92). Leuven University Press.
- Chloupek, B. (2018). A GIS approach to cultural and historical toponymic research in Nebraska. *Journal of Cultural Geography*, 35(1), 23-43.
- Commons, A. (1989). La minería en Nueva España en el siglo XVIII. *Investigaciones geográficas*, 1(19), 89-103.
- Contreras, C. (1995). Las Ordenanzas de minería de 1783. La polémica entre Gamboa y el Tribunal de Minería. *Revista Historias*, 36, 39-53.
- Corona, P., y Uribe, J. (2009). *Atlas cartográfico del distrito minero El Oro y Tlalpujahua, Morelia Michoacán*, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Michoacán.
- DeBats, D., y Gregory, I., (2011). Introduction to historical GIS and the study of urban history. *Social Science History*, 35(4), 455-463.
- Desimini, J. (2019). Cartographic Grounds, The Temporal Cases. En Coomans, T., Cattoor, B., y De Jonge, K. (eds.), *Mapping Landscapes in Transformation Multidisciplinary Methods for Historical Analysis* (pp. 17-43). Leuven University Press.
- Ellian, P., y Gregory, I. (2001). Adding a new dimension to historical research with GIS". *History and Computing*, 13(1), 1-6.
- García, B. (2008). *Las regiones de México. Breviario geográfico e histórico*. El Colegio de México.

- Gavira, M. (2006). Población y producción de plata en el real de minas de Tlalpujahua a mediados del siglo XVIII. *Estudios de Historia Novohispana*, 34(34), 17-45.
- Gerhard, P. (1993). *A guide to the historical geography of New Spain*, University of Oklahoma Press.
- Gil, R. (2012). Tecnología minera en los siglos XVI-XIX: una perspectiva comparada. En Bodemer, K. (coord.), *Cultura, sociedad y democracia en América Latina. Aportes para un debate interdisciplinario* (pp. 305-326) Iberoamericana.
- Gorbea, J. (1968). La arquitectura militar en la Nueva España. *Estudios de Historia Novohispana*, 2(2), 1-29.
- Gregory, I., Kemp, K., y Mostern, R. (2001). Geographical Information and historical research: current progress and future directions. *History and Computing*, 13(1), 7-21.
- Gregory, I. y Healey, R. (2007). Historical GIS: structuring, mapping and analysing geographies of the past. *Progress in Human Geography*, 31(5), 638-653.
- Gregory, I., y Geddes, A., (2014) *Toward spatial humanities: Historical GIS and spatial history*. Indiana University Press.
- Guzmán, C. (2017). Investigación histórica, los SIG y las nuevas posibilidades epistemológicas y metodológicas. En Urquijo, P., Vieyra, A., y Bocco, G. (coords.), *Geografía e historia ambiental* (pp. 193-214). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Harley, B. (1989). Historical geography and the cartographic illusion. *Journal of Historical Geography*, 15(1), 80-91.
- Hausberger, B. (1993). La minería novohispana vista por los libros de carga y data de la Real Hacienda. *Estudios de historia novohispana*, 1(15), 35-66.
- Healey, R., y Stamp, T., (2000). Historical GIS: The spatial turn in social science history. *Social Science history*, 23(3), 575-612.
- Hunter, R., y Sluyter, A. (2011). How incipient colonies create territory: The textual surveys of New Spain, 1520s-1620s. *Journal of Historical Geography*, 37(3), 288-299.
- Hunter, R. (2012). Land use change in New Spain: A three-dimensional historical GIS analysis. *The Professional Geographer*, 66(2), 260-273.
- Jáuregui, L. (1999). *La Real Hacienda de Nueva España, su administración en la época de los intendentes 1786-1821*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Economía.
- Lang, M. (1977). *El monopolio estatal de mercurio en el México Colonial (1550-1710)*. Fondo de Cultura Económica.
- Lefebvre, K. (2018). Los procesos de colonización agropecuaria de la región de Acámbaro-Maravatío durante el siglo XVI. *Estudios de Historia Novohispana*, 58, 32-71.
- Levin, N., Kark, R., y Galilee, E. (2010). Maps and the settlement of southern Palestine, 1799-1948: an historical/GIS analysis. *Journal of Historical Geography*, 36(1), 1-18.
- Lois, C. (2015). El mapa, los mapas: Propuestas metodológicas para abordar la pluralidad y la inestabilidad de la imagen cartográfica. *Geograficando*, 11(1), 1-23.
- López, C., y Moncada, O. (2012). Los espacios para la producción como elementos estructuradores del territorio en la región de Valladolid. En De Ita, L., (coord.), *Organización del espacio en el México Colonial: puertos, ciudades y caminos* (pp. 353-388). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

- MacDonald, B. y Black, F. (2000). Using GIS for spatial and temporal analyses in print culture studies: Some opportunities and challenges. *Social Science History*, 24(3), 505-536.
- Meléndez, A. (2013). *Real de Minas de El Oro, la ciudad deseada en el plano de Manuel Agustín Mascaró 1786-1803*. Secretaría de Educación del Gobierno del Estado de México.
- Moncada, O. (2018). La cartografía de los ingenieros militares. Instrumento para el conocimiento del territorio. *Revista de geografía Norte Grande*, 1(69), 9-31.
- Murrieta, P., Favila, M., y Flores, A. (2019). Spatial Humanities 3.0: Qualitative spatial representation and semantic triples as new means of exploration of complex indigenous spatial representations in sixteenth century early colonial Mexican maps. *International Journal of Humanities and Arts Computing*, 13(1), 53-68.
- Navarro, A. (2023). Construcción de una frontera en el oeste del obispado de Chiapa y Soconusco, 1650-1810. Una aproximación desde los SIG-H. *Revista Geográfica de América Central*, 70(1), 57-90.
- Pelayo, F. (1990) Las actividades mineras de J. C. Mutis y Juan José Elhuyar en Nueva Granada. *Revista de Indias*, 50(189), 455-471.
- Pérez, P. (1991). Los beneficiarios del reformismo borbónico: metrópoli versus élites novohispanas. *Historia mexicana*, 41(2), 207-264.
- Povea, I. (2018). Conflictos y negociaciones. La defensa de los arreglos laborales tradicionales por parte de los trabajadores mineros de Nueva España, segunda mitad del siglo XVIII. *Tiempos modernos*, 37(2), 234-257.
- Propin, E., y Sánchez, Á., (2001). Características básicas de la estructura territorial de la economía mexicana. *Investigaciones Geográficas*, 46, 148-163.
- Sariego, J. (1994). Minería y territorio en México: tres modelos históricos de implantación socioespacial. *Estudios demográficos y urbanos*, 9(2), 327-337.
- Schindling, J., y Harris, T., (2018). Deepening Historical GIS: An Integrated Database Solution for Linking People, Place and Events through Unstructured Text. *International Journal of Humanities and Arts Computing*, 12(2), 120-137.
- Schleiden, E. (1856). *Informe de la mina de San Buenaventura en Tlalpujahua*.
- Sluyter, A. (1999). The making of the myth in postcolonial development: material-conceptual landscape transformation in sixteenth-century Veracruz. *Annals of the Association of American Geographers*, 89(3), 377-401.
- Stangl, W. (2019). A Matter of Scales: Understanding Spatial Patterns of Colonial Spanish America's Silver Mining in the Digital Age. En Pieper, R., Lozanne C., y Denzel, M. (eds.), *Mining, Money and Markets in the Early Modern Atlantic Digital Approaches and New Perspectives* (pp. 87-126). Palgrave Studies in Economic History.
- Suter, M. (2016). Early 19th century geologic studies of the Zimapán region, central Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(2), 215-230.
- Rojas, I. (2008). El estudio histórico de la cartografía. *Takwá, Revista de historia*, 1(13), 11-32.
- Rumsey, D., y Williams, M. (2002). Historical Maps in GIS. En Knowles, A. (coord.) *Past time, past place: GIS for History* (pp. 1-18). ESRI Press.
- Uribe, J. (2001). Economía y mercado en la minería tradicional mexicana, 1873- 1929. *Revista de Indias*, 61(222), 267-290.

- Uribe, J. (2005). Los minerales de el oro y Tlalpujahua en el concierto internacional de los siglos XIX Y XX. *Economía y Sociedad*, 10(15), 169-184.
- Uribe, J. (2009). *Historia económica y social de la Compañía y Cooperativa Minera Las Dos Estrellas, en El Oro y Tlalpujahua, 1898-1959*. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.
- Uribe, J. (2014). La plata en el mineral de Tlalpujahua a través de los estudios geológico-mineros de Joseph Burkart y Teodoro Flores Reyes, 1869-1920. En Vasconcelos, G., Paniagua, J., y Salazar, N. (coords.), *Áurea quersoneso: estudios sobre la plata iberoamericana: siglos XVI-XIX* (pp. 73-88). México: Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.
- Tamayo, J. (1943). La minería de Nueva España en 1794. *El trimestre económico*, 10(38), 287-319.
- Trabulse, E. (1981). Aspectos de la tecnología minera en Nueva España a finales del siglo XVIII. *Historia mexicana*, 119(3), 311-357.
- Tucci, M., Ronza, R., y Giordano, A., (2011). Fragments from many pasts: Layering the toponymic tapestry of Milan. *Journal of Historical Geography*, 37(3), 370-384.
- Velasco, C. (1987). Política borbónica y minería en Nueva España, 1766-1810. *Historias. Revista de la Dirección de Estudios Históricos del INAH*, 1(30), 89-113.
- Viales, R. (2010). La región como construcción social, espacial, política, histórica y subjetiva. Hacia un modelo conceptual/relacional de historia regional en América Latina, *Geopolítica(s) Revista de estudios sobre espacio y poder*, 1(1), 157-172.
- Zohar, M. (2019). Follow the road: historical GIS for evaluating the development of routes in the Negev region during the twentieth century. *Cartography and Geographic Information Science*, 46(6), 532-546.

9. El paisaje como unidad de análisis para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos de la Cuenca Arroyo Sabinal, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

ANA JUDITH DE COSS PÉREZ*

LUIS GIOVANNI RAMÍREZ SÁNCHEZ**

HORACIO MORALES IGLESIAS***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.279.09>

Resumen

Los deslizamientos de laderas son considerados uno de los peligros naturales más destructivos en México, debido a las condiciones geográficas que presenta el país (relieve montañoso, lluvias extremas y la actividad antrópica). Estos fenómenos generan afectaciones significativas en la población y daños a la infraestructura. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la susceptibilidad a deslizamientos, a partir del análisis de unidades de paisajes físico-geográficos a escala 1:50 000 en la Cuenca del Arroyo Sabinal, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Para ello, se empleó la metodología modificada de Mora-Vahrson, que considera factores condicionantes como: 1) pendiente, 2) litología, 3) tipo de suelo, 4) uso de suelo. Los resultados mostraron que las categorías con alta y muy alta susceptibilidad abarcan el 25.18% de la cuenca y se localizan en paisajes de Montañas, Lomeríos y Piedemonte. Los resultados de este estudio son útiles para la formulación de estrategias de mitigación y/o prevención ante este tipo de eventos.

* Maestra en Gestión de Riesgos. Investigadora del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5073-5901>; correo: anajudith.decos@gmail.com

** Doctor en Geografía. Investigador por México SECIHTI-El Colegio Mexiquense A. C. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0509-3413>

*** Doctor en Geografía. Profesor-investigador del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7219-8509>

Palabras clave: *amenaza, deslizamientos, paisajes, arroyo Sabinal.*

Introducción

Los fenómenos naturales como los deslizamientos se han presentado con mayor frecuencia en los últimos años (Rodríguez y Rivera, 2023). Este aumento se debe principalmente a la intensificación de los fenómenos hidrometeorológicos y las actividades antrópicas, especialmente el cambio de uso de suelo por el crecimiento de áreas urbanas que se extienden hacia las zonas montañosas propensas a deslizamientos (Jiménez y Aristizábal, 2018). Como consecuencia, estos eventos provocan afectaciones directas a la población y a la infraestructura, como viviendas, vías de comunicación, alumbrado público, sistema de agua potable, entre otros (Lakakis y Savvaidis, 2009; Huang y Zhao, 2018).

En México, los estados con mayor incidencia de deslizamientos son Chiapas, Puebla, Veracruz, Oaxaca y Guerrero, debido a la presencia de sistemas montañosos con características geológicas, geomorfológicas, estructurales y climáticas que aumentan la probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos (González *et al.*, 2015 y Domínguez *et al.*, 2016).

De acuerdo con lo anterior, la mayor parte del territorio de Chiapas está conformado por sistemas montañosos, con pendientes que superan los 40° (Oregel *et al.*, 2016). A esta condición se suman la sismicidad, los eventos hidrometeorológicos (huracanes, ciclones tropicales y frentes fríos) y la actividad humana, como la deforestación y el cambio de uso de suelo, lo que favorece la ocurrencia de deslizamientos (Gómez *et al.*, 2016; López, 2020).

A nivel local, la ciudad de Tuxtla Gutiérrez ha registrado eventos de deslizamientos de laderas (CECOM A. C., 2010), especialmente en los depósitos de talud de la meseta kárstica de Copoya, que se encuentra sujeta a procesos de disolución y erosión (Paz, *et al.*, 2017). Estos eventos han generado afectaciones directas a los habitantes e infraestructura, como viviendas, calles, carreteras, banquetas, parques, canchas y sistemas de agua potable y drenaje (Paz, *et al.*, 2011).

Actualmente, la Cuenca del Arroyo Sabinal (CAS) tiene registrados tres eventos de remoción en masa, éstos se localizan en la zona este, cerca del

Cerro Mactumatzá, donde los niveles de susceptibilidad son de moderados a muy altos (Paz, *et al.*, 2017), el resto de la cuenca carece de información.

El presente estudio se desarrolló desde la perspectiva de la geoecología del paisaje, que considera al paisaje físico-geográfico como unidad espacial de análisis para identificar las zonas susceptibles a deslizamientos; en este contexto, el concepto de paisaje se refiere al espacio donde interactúan elementos naturales, como el clima, el tipo de roca, el tipo de suelo y el uso del suelo, con los elementos sociales (Antrop y Van, 2019; Miklós *et al.*, 2019). Así, el paisaje se entiende como el territorio ocupado por grupos sociales, quienes lo modifican a través de sus actividades (Mateo, 2000).

Desde el anterior punto de vista, la cartografía obtenida a partir del análisis de paisajes físico-geográficos constituye una herramienta clave para evaluar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos.

Metodología

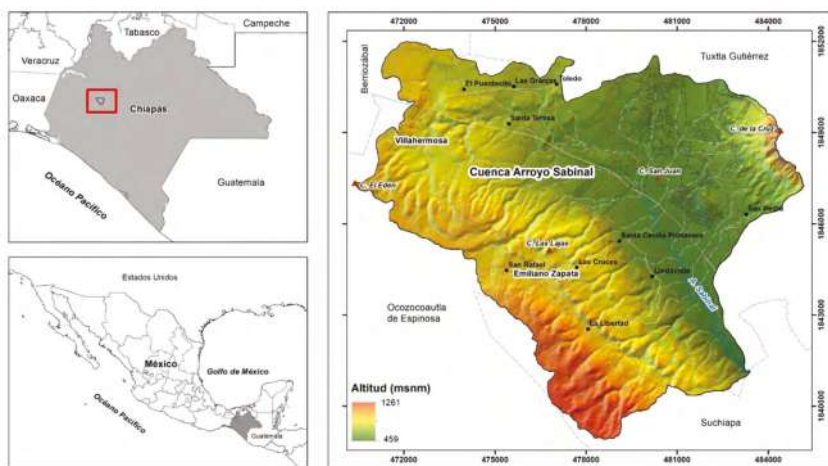
Descripción del área de estudio

La Cuenca del Arroyo Sabinal se localiza al sureste de la República Mexicana, en el estado de Chiapas. Esta unidad hidrográfica abarca una superficie de 109.14 km² y tiene una población de 48 843 habitantes en los municipios de Tuxtla Gutiérrez (71.70%), Ocozocoautla de Espinosa (15.62%), Suchiapa (9.82%) y Berriozábal (2.85%). Las coordenadas extremas son: 16°37'57.7" y 16°45'2.1" de latitud norte y 93°8'20.92" y 93°16'40.1" de longitud oeste (figura 1); en este marco espacial, la Cuenca limita al norte con la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez; al este con la Meseta de Copoya; al sur con el municipio de Suchiapa; al oeste con Ocozocoautla de Espinosa y al noroeste con Berriozábal.

Por otra parte, el subsistema abiótico de la cuenca está conformado por un clima cálido subhúmedo, con temperaturas anuales superiores a 22°C y precipitaciones que varían entre 0 y 60 mm, con lluvias en verano (García y Conabio, 1998). Respecto al componente litológico, predominan las rocas sedimentarias, donde destaca la caliza bioclástica debido a que cubre 47.02% de la Cuenca, este tipo de roca se ubica principalmente en paisajes de lome-

ríos y planicies acolinadas; también destaca en el centro de la zona de estudio la presencia de lutitas-areniscas en paisajes de planicie, calizas-areniscas-lutitas en los lomeríos, calizas arrecifales en montañas y lomeríos, derrubios en piedemonte y calizas-areniscas en montañas (INEGI, 1985; Ruiz, 2014).

Figura 1. Localización de la Cuenca Arroyo Sabinal



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los tipos de suelos, sobresale la presencia de Vertisoles, Regosoles, Litosoles y Rendzinas (INEGI, 1985). Respecto a la vegetación y uso de suelo, destaca el predominio de la vegetación secundaria de selva baja caducifolia, ésta cubre el 40% de la superficie de la Cuenca y se distribuye principalmente en paisajes de montañas y lomeríos; le sigue la actividad agrícola, que ocupa el 30% del área de estudio y se localiza en paisajes de planicies, mientras que la zona urbana se concentra principalmente al norte; este uso de suelo junto con los pastizales y las áreas desprovistas de vegetación ocupan una menor superficie.

Materiales y métodos

Para evaluar los grados de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la CAS, se utilizó la cartografía de los paisajes físico-geográficos de la Cuenca

a escala 1:50 000, propuesta por De Coss-Pérez (2024). Este mapa se elaboró mediante el análisis e integración de componentes biofísicos (geomorfología, litología, clima, pendiente, uso de suelo y edafología), donde se identificaron ocho localidades, 15 parajes complejos y 53 parajes simples; esto permitió segmentar el territorio de manera adecuada para el análisis.

Por otra parte, se identificaron los paisajes físico-geográficos susceptibles a deslizamientos a través del método propuesto por Mora-Vahrson (1994); que clasifica los factores en dos tipos: condicionantes (pendiente, litología y humedad) y desencadenantes (precipitación y sismicidad); sin embargo, dado que el objetivo principal de este estudio es analizar la susceptibilidad, es decir, identificar aquellos paisajes cuyas condiciones estructurales son favorables para desencadenar deslizamientos sin considerar los eventos que los desencadenan, se decidió centrarse únicamente en los factores condicionantes. Este enfoque permite un análisis detallado de las condiciones geográficas y biofísicas que favorecen la ocurrencia de deslizamientos (Suárez, 2009).

La fórmula original para calcular la susceptibilidad a deslizamientos se expresa de la siguiente manera:

$$S = FC * FD$$

donde:

S es la susceptibilidad

FC son los factores condicionantes

FD representan los factores desencadenantes

dado que en este estudio no se consideraron los factores desencadenantes, la ecuación fue modificada para centrarse únicamente en los factores condicionantes. La versión adaptada de la fórmula es la siguiente:

$$S_{i=1}^n = (Pend_i * A) + (Lito_i * B) + (Edaf_i * C) + (UsyV_i * D)$$

donde:

Si es la susceptibilidad de cada polígono
A, B, C y D = pesos de cada variable
 $Pend_p$, $Lito_p$, $Edaf_p$, $USyV_i$ son valores correspondientes a pendiente, litología, edafología y uso de suelo del polígono

Para la asignación de los pesos se consideró la influencia de cada componente a través de una escala de 0.1 a 0.9, donde 0.1 indica menor susceptibilidad y 0.9 mayor susceptibilidad; por ejemplo, en el factor Pendiente se asignaron valores más altos a las áreas con mayor inclinación, dado que, a mayor pendiente el paisaje tiene una probabilidad superior de que ocurra un deslizamiento (tabla 1). De esta manera se asignaron los siguientes pesos a cada variable:

- Pendiente (A): se consideró que los paisajes con pendientes mayores a un cierto umbral tienen mayor riesgo de deslizamientos, por lo que se asignaron valores más altos a las pendientes más elevadas.
- Litología (B): la litología juega un papel fundamental, debido a que tienen distintas características de resistencia al deslizamiento.
- Edafología (C): los tipos de suelo influyen en la susceptibilidad; en este sentido, los más frágiles o con menor capacidad de retención de agua tienen una mayor probabilidad de deslizamientos.
- Uso de suelo (D): el uso de suelo afecta la estabilidad del terreno, ya que las actividades humanas, como la urbanización o la agricultura, pueden alterar las condiciones naturales y aumentar el riesgo de deslizamientos.

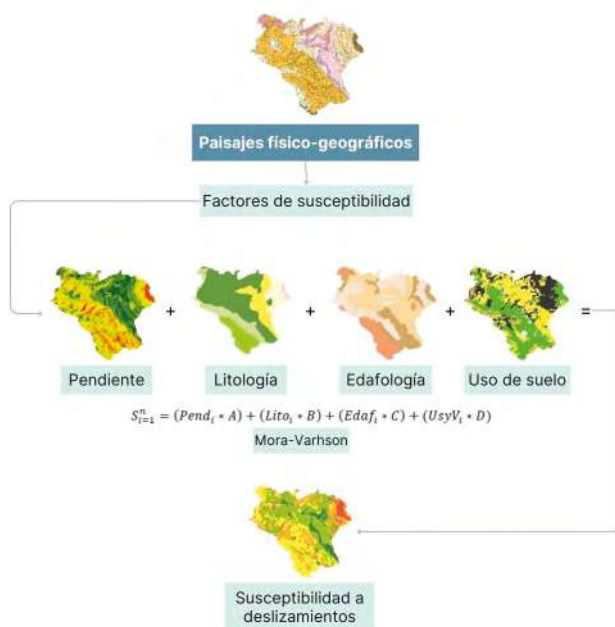
Tabla 1. Ponderación de variables

Variables		Ponderación
Pendiente	<1°	0.1
	1°-3°	0.2
	3°-5°	0.3
	5°-10°	0.5
	10°-15°	0.6
	15°-20°	0.7
	20°-30°	0.8
	30°-45°	0.9

	<i>Variables</i>	<i>Ponderación</i>
Litología	Lutitas areniscas	0.1
	Calizas arrecifales	0.4
	Calizas bioclásticas	0.5
	Calizas-areniscas-lutitas	0.6
	Calizas-areniscas	0.7
	Derrubios	0.9
Edafología	Vértisol pélico en planicie	0.1
	Vértisol en ladera	0.2
	Litosol	0.3
	Rendzina	0.7
	Regosol calcárico	0.9
Uso de suelo y vegetación	Pastizal	0.2
	Vegetación secundaria de selva baja caducifolia	0.3
	Agricultura	0.4
	Zona urbana	0.8
	Áreas desprovistas de vegetación	0.9

Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Diagrama de flujo de la secuencia metodológica



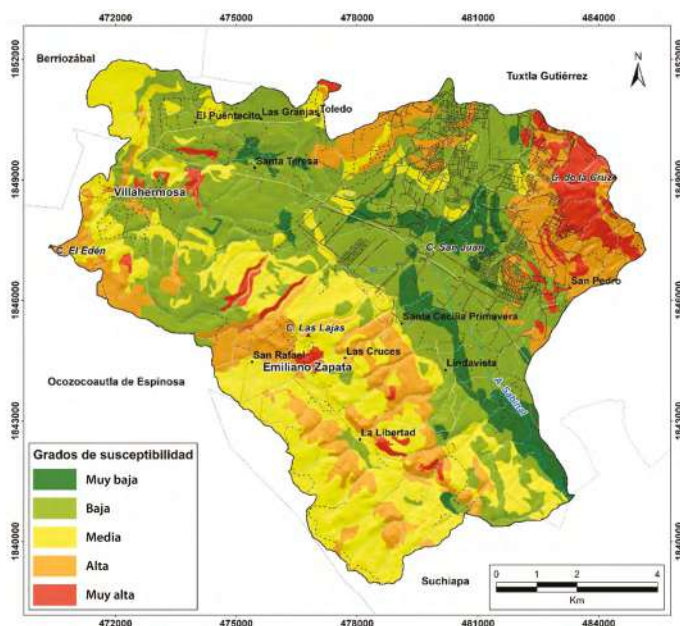
De acuerdo con lo anterior, los 421 paisajes (polígonos) que conforman la cuenca fueron evaluados, los resultados obtenidos se clasificaron en cinco categorías de susceptibilidad: muy baja, baja, media, alta y muy alta, mediante el método de rompimiento “Natural Breaks” (Jenks). Esta clasificación permitió generar un mapa de susceptibilidad, que identifica los paisajes físico-geográficos con mayor probabilidad de deslizamientos. De acuerdo con la secuencia metodológica (figura 2), la cartografía obtenida es una herramienta clave para la planificación territorial y la mitigación de riesgos en la región.

Resultados y discusión

Susceptibilidad a deslizamientos de laderas

Con la metodología modificada de Mora-Vahrson (1994) se identificaron las categorías de susceptibilidad a deslizamientos de los paisajes de la CAS

Figura 3. *Susceptibilidad a deslizamientos de laderas*



Fuente: elaboración propia.

(figura 3). En este sentido, los resultados mostraron que el factor de mayor influencia en los altos grados de susceptibilidad es la inclinación del terreno, seguido por el uso de suelo urbano y las áreas desprovistas de vegetación.

La mayor parte de los paisajes de la Cuenca presenta baja susceptibilidad (40.10%), le sigue el nivel medio con 27.98%, posteriormente, se ubica la clase alta con 19.69%, las categorías muy baja y muy alta representan apenas 6.75% y 5.49%, respectivamente (tabla 2).

Tabla 2. Extensión territorial de los grados de susceptibilidad a deslizamientos

<i>Grados de susceptibilidad</i>	<i>Área (km²)</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
Muy baja	7.37	6.75
Baja	43.76	40.10
Media	30.53	27.98
Alta	21.48	19.69
Muy alta	5.99	5.49

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Definición de los grados de susceptibilidad a deslizamientos de laderas

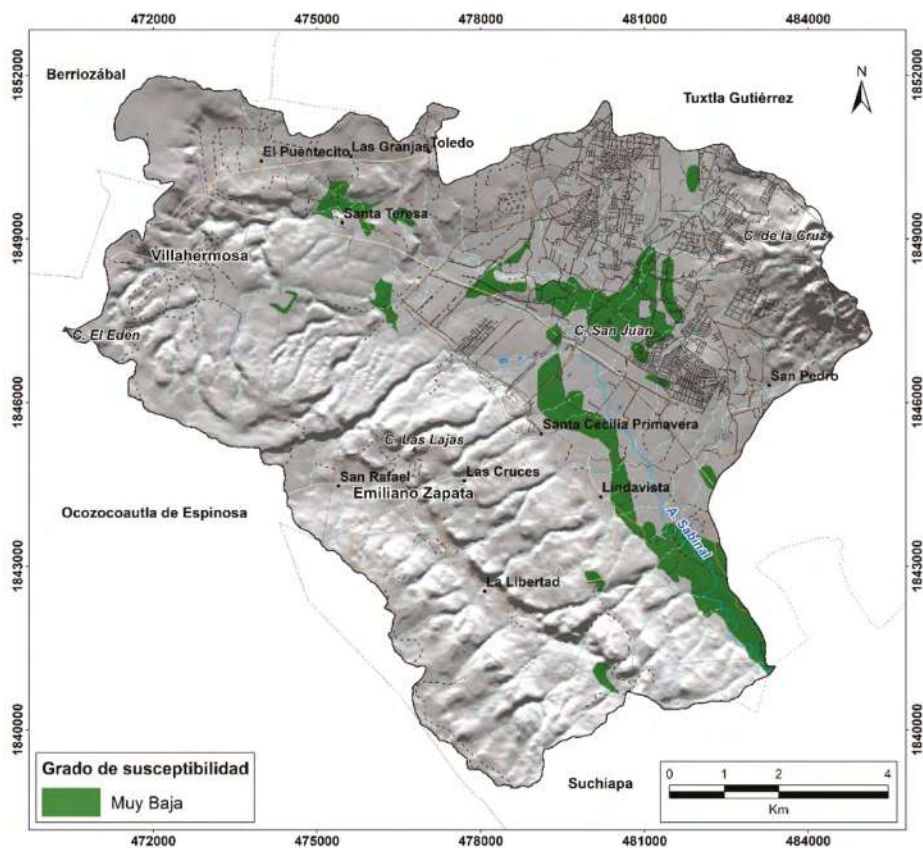
<i>Grado de susceptibilidad</i>	<i>Rango</i>	<i>Descripción</i>
Muy baja	0.23 – 0.39	Geocomplejos que se encuentran en superficies planas, donde las características litológicas, edafológicas y de usos del suelo no favorecen a la ocurrencia de deslizamientos.
Baja	0.39 – 0.48	Geocomplejos que tienen pendientes poco pronunciadas, con tipos de roca, suelos y vegetación y uso de suelo no influyen de manera representativa a la ocurrencia de deslizamientos.
Media	0.48 – 0.57	Geocomplejos con características de pendiente, roca, tipo suelo y uso de suelo que comienzan a ser factores importantes en la susceptibilidad.
Alta	0.57 – 0.66	Geocomplejos donde la inclinación del terreno y los materiales del tipo de roca, tipo de suelo y uso de suelo contribuyen de manera representativa a la ocurrencia de deslizamientos.
Muy alta	0.66 – 0.77	Geocomplejos que reúnen características favorables para una mayor probabilidad de deslizamientos como: pendientes pronunciadas, tipo de roca, tipo de suelo y uso de suelo.

Fuente: modificado de Ramírez, *et al.*, 2021.

La evaluación de la susceptibilidad indica que los paisajes de planicies tectónico-kársticas y tectónico-acumulativas, ubicados principalmente en el extremo noroeste y la zona central de la cuenca presentan un nivel muy bajo de susceptibilidad (figura 4); esto se debe al tipo de pendiente, donde, los rangos varían entre $<1^\circ$ a 3° y de 3° a 5° , donde la litología está conformada

por asociaciones de lutitas-areniscas y calizas bioclásticas; en este caso, los suelos (Vertisoles, Litosoles y Regosoles) y el uso de suelo (vegetación secundaria de selva, agricultura y zona urbana) son factores que no favorecen al proceso de deslizamiento.

Figura 4. Grado de susceptibilidad muy baja

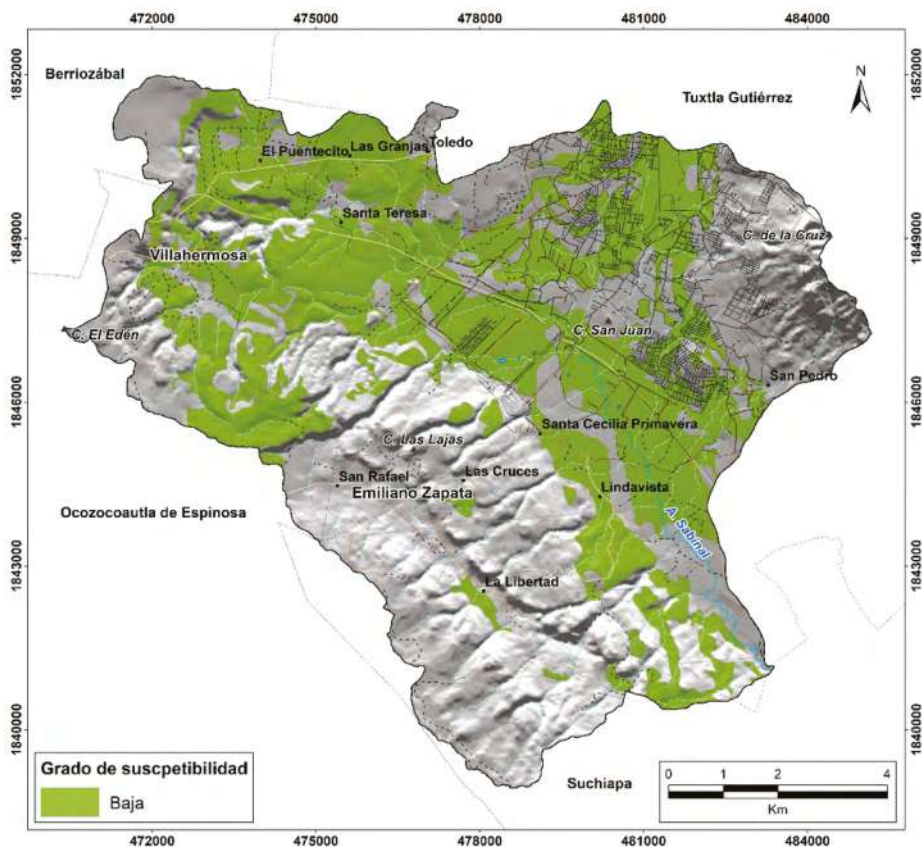


Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, la clase de susceptibilidad baja (figura 5) se dispone en paisajes de planicies y lomeríos de génesis tectónico-acumulativo y tectónico-kárstico en clima cálido subhúmedo, que se ubican en las partes norte, sur, noroeste y centro de la zona de estudio. La estructura de estos paisajes-pendientes moderadas a bajas ($<1^\circ$, 3° - 5° y 10 - 15°), formadas por asociaciones de

rocas sedimentarias terrígenas y químico-carbonatadas (calizas bioclásticas, lutitas-areniscas, calizas-areniscas-lutitas y calizas arrecifales) con vegetación secundaria de selva, agricultura y zonas urbanas sobre suelos de tipo Litosol, Regosol, Vertisol y Rendzinas, no favorecen la ocurrencia de deslizamientos.

Figura 5. *Grado de susceptibilidad baja*

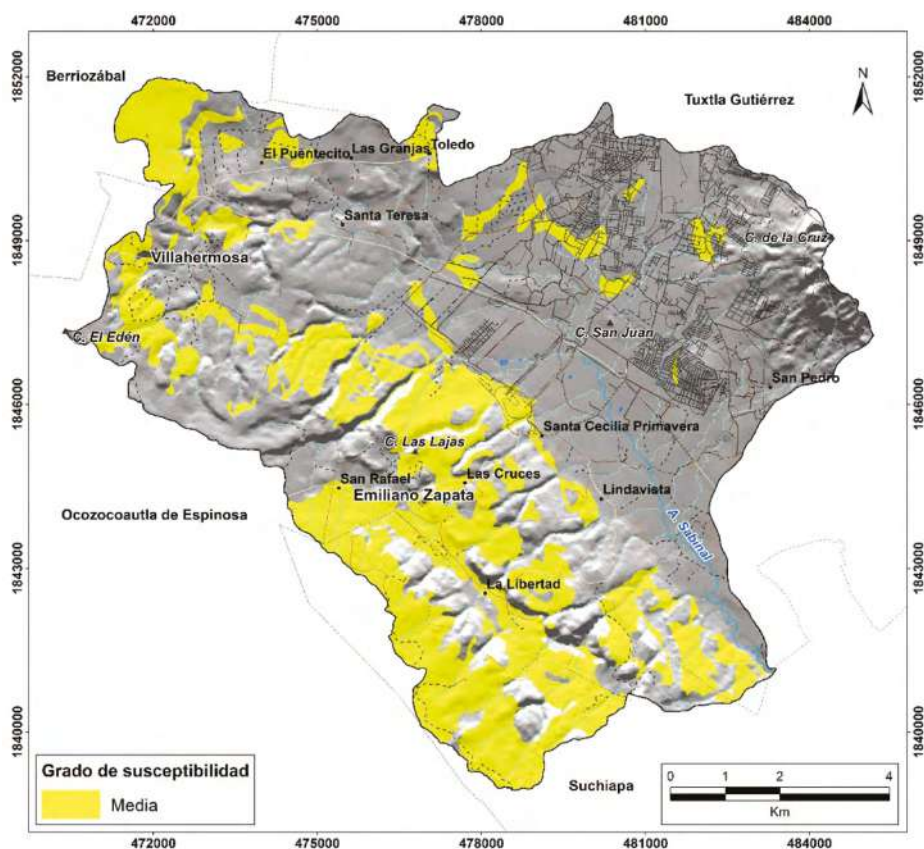


Fuente: elaboración propia.

Por su parte, la categoría de susceptibilidad media (figura 6) se distribuye en paisajes de lomeríos, planicies, montañas, valles y piedemonte de origen tectónico-kárstico, tectónico-acumulativo y fluvio-torrencial en clima cálido subhúmedo, éstos se localizan en las zonas sur, oeste y noroeste de la Cuenca.

En este sentido, las características estructurales de estos paisajes comienzan a influir de manera significativa en la probabilidad de deslizamientos debido a la presencia de pendientes más pronunciadas (20° - 30°); en el caso del componente litológico, las rocas están representadas por calizas arrecifales, calizas bioclásticas y asociaciones de calizas-areniscas-lutitas; mientras que el componente edáfico está constituido por Rendzinas, Litosoles, Regosoles, y Vertisoles; el uso de suelo está integrado por vegetación secundaria de selva baja caducifolia, agricultura, zona urbana y en menor proporción por áreas desprovistas de vegetación y pastizales.

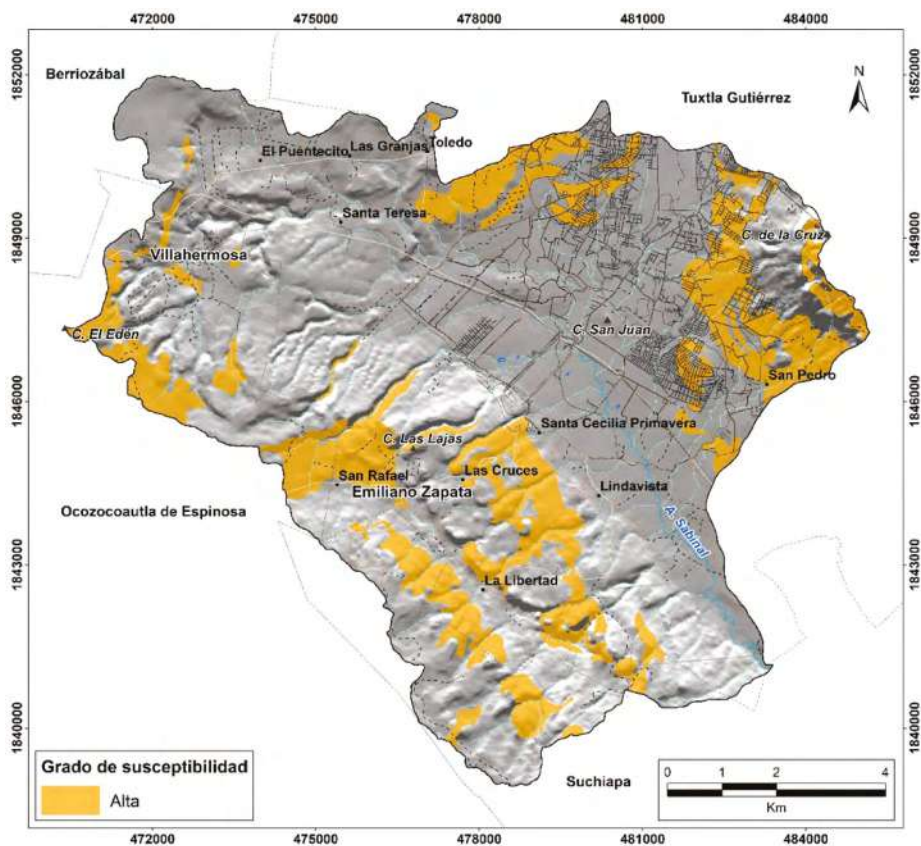
Figura 6. Grado de susceptibilidad media



Fuente: elaboración propia.

La clase de susceptibilidad alta (figura 7) se dispone principalmente en paisajes de montañas y lomeríos tectónico-kársticos, piedemonte fluvio-torrencial, planicies y valles tectónico-acumulativos, que se ubican en las zonas norte, este, suroeste y al oeste de la Cuenca. Estos paisajes representan una elevada probabilidad para la ocurrencia de deslizamientos debido a la sinergia de varios componentes, como las pendientes elevadas (20° - 30°), la litología (derrubios, calizas-areniscas-lutitas), los suelos (Litosol, Regosol, Rendzina), y el uso de suelo (agrícola, urbano, pastizales y áreas desprovistas de vegetación).

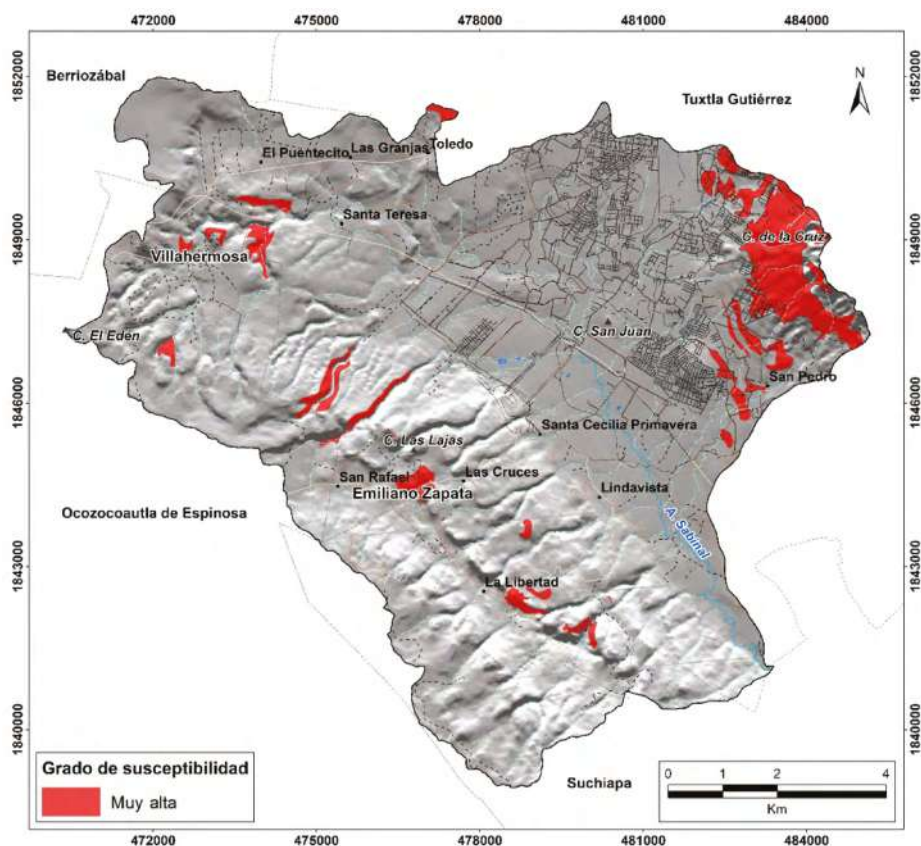
Figura 7. Grado de susceptibilidad alta



Fuente: elaboración propia.

La clase de susceptibilidad muy alta (figura 8) se establece en paisajes de piedemonte fluvio-torrencial, montañas y lomeríos tectónico-kárstico en clima cálido subhúmedo, estas unidades geográficas se localizan en el extremo noreste y, de manera dispersa en las partes centro-sur y oeste de la Cuenca. En este sentido, las pendientes elevadas (30° - 45°) combinadas con una litología de derrubios, calizas bioclásticas y calizas-areniscas-lutitas con la presencia de suelos de tipo Litosol y Regosol, aunado a un uso de suelo urbano y agrícola con presencia de áreas desprovistas de vegetación, incrementan la probabilidad de deslizamiento.

Figura 8. Grado de susceptibilidad muy alta



Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la composición geomorfológica de los paisajes, según su nivel de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca, se destaca lo siguiente (tabla 4):

- El relieve de paisajes con susceptibilidad muy baja está dominado por planicies —baja energía—, que representa el 91.12% del área total.
- Los paisajes de susceptibilidad baja presentan una estructura geomorfológica más heterogénea, en este caso las planicies abarcan 59.03% de la superficie, mientras que los lomeríos ocupan 36.21% del área total.
- El componente geomorfológico de la clase de susceptibilidad media está representado principalmente por lomeríos y planicies; en este caso, el primer tipo de relieve representa 67.76% de la superficie de la categoría, mientras que el segundo abarca 28.19%. En comparación con los niveles anteriores, los tipos de relieve del presente nivel categoría invierten la proporción de superficie ocupada.
- Los paisajes de susceptibilidad alta muestran una mayor heterogeneidad geomorfológica, donde, los lomeríos ocupan 43.02%, las planicies acolinadas 31.10% y el piedemonte 20.27%.
- Finalmente, los paisajes de susceptibilidad muy alta manifiestan una elevada heterogeneidad geomorfológica; en este sentido, el piedemonte ocupa 52.89%, los lomeríos 29.84% y las montañas 12.94%.

Tabla 4. Grados de susceptibilidad a deslizamientos en las distintas geoformas.

GSDL	Muy baja		Baja		Media		Alta		Muy alta	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Montañas	-	-	-	-	0.56	1.85	0.77	3.57	0.77	12.94
Lomeríos	0.29	3.96	15.85	36.21	20.69	67.76	9.24	43.02	1.79	29.84
Piedemonte	0.36	4.91	2.08	4.76	0.29	0.95	4.35	20.27	3.17	52.89
Valles	-	-	-	-	0.38	1.26	0.44	2.04	0.04	0.70
Planicies	6.71	91.12	25.83	59.03	8.61	28.19	6.68	31.10	0.22	3.63

Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran que existe una clara correlación entre las características geomorfológicas del paisaje y los grados de susceptibilidad a deslizamientos en la Cuenca; en este sentido, la interacción de las pendientes

pronunciadas con la litología (rocas inestables) y el uso de suelo (agricultura, zona urbana) de los paisajes de piedemonte fluvio-torrencial y lomeríos tectónico-kársticos incrementan los niveles de susceptibilidad.

En contraste, los paisajes de planicies tectónico-acumulativos y lomeríos tectónico-kársticos ubicados principalmente en el extremo noroeste y centro de la Cuenca, presentan condiciones más estables, debido a que cuentan con pendientes bajas, rocas y suelos que dificultan la ocurrencia de deslizamientos. La mayor parte de la cuenca (40.10%) tiene una baja susceptibilidad.

El análisis muestra que la actividad humana, especialmente la deforestación y la expansión urbana hacia áreas de riesgo, agrava la susceptibilidad a deslizamientos. En Tuxtla Gutiérrez, la urbanización de las laderas del Cerro Mactumatzá y los asentamientos rurales en paisajes de lomeríos con alta susceptibilidad aumentan el riesgo para las comunidades e infraestructura expuestas. Estas áreas, ya vulnerables por sus características naturales y el cambio de uso de suelo, se ven aún más amenazadas por la intervención humana.

Finalmente, los resultados coinciden con investigaciones previas (Cuanalo, *et al.*, 2006; Paz, *et al.*, 2017), que identificaron patrones similares de susceptibilidad a deslizamientos en paisajes montañosos con características geológicas y geomorfológicas comparables; sin embargo, la presente investigación se distingue por emplear unidades geográficas objetivas, lo que ofrece un análisis más detallado y preciso, desde una perspectiva geográfica integral del territorio en riesgo.

Conclusiones

El método empleado permitió identificar el grado de susceptibilidad a deslizamientos de los paisajes de la Cuenca, proporcionando una distribución espacial detallada. Los factores condicionantes utilizados en el análisis, como litología, pendiente, tipo de suelo y uso de suelo, demostraron que la geomorfología, la litología y la pendiente son los factores con mayor influencia en la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos.

El enfoque metodológico Mora-Vahrson reveló que una cuarta parte del territorio (25.18%) presenta un grado de susceptibilidad alta y muy alta

a deslizamientos. Estas categorías se ubican principalmente en las faldas del Cerro Mactumatzá, en zonas que actualmente experimentan crecimiento urbano de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez; por tanto, es crucial prestar especial atención a estas áreas e implementar estrategias de mitigación y prevención de deslizamientos en estos paisajes.

Por otro lado, los paisajes con grados de susceptibilidad media, baja y muy baja predominan en la Cuenca, ocupan un 74.82% del área total. En estas zonas, es posible aplicar estrategias de planificación y ordenamiento territorial, con el objetivo de prevenir la ocurrencia de deslizamientos y proteger a la población que se encuentra asentada en estos paisajes.

Con el fin de prevenir desastres ocasionados por deslizamientos, se recomienda considerar la cartografía obtenida en este estudio como una herramienta clave para la planificación del crecimiento urbano de Tuxtla Gutiérrez. Se sugiere orientar el desarrollo urbano de manera que evite la expansión hacia las zonas susceptibles, donde los factores como la pendiente pronunciada, el tipo de roca, el tipo de suelo y el uso de suelo favorecen la ocurrencia de deslizamientos.

El presente estudio proporciona una herramienta valiosa para la comunidad científica, las autoridades gubernamentales y las organizaciones interesadas en la prevención de desastres. Los resultados obtenidos y las herramientas generadas pueden servir de base para la toma de decisiones en políticas públicas, enfocadas en la gestión y prevención de deslizamientos de laderas en la Cuenca del Arroyo Sabinal, en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Referencias

- Antrop M. y Van Eetvelde, V. (2019). Territory and/or Scenery: Concepts and Prospects Of Western Landscape. Current Trends in Landscape. Research. Editors: Mueller, L. y Eulenstein, F. Springer.
- Centro de Investigación y Consultoría Aplicada (CECOM A. C.). (2010). Atlas de Riesgos del municipio de Tuxtla Gutiérrez.
- Cuanalo C. O. A., Quezada P. P., Aguilar M. A., Olivan R. A. M. y Barona D. E. (2006). Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas de Puebla, Mexico. e-Gnosis. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73000413>

- De Coss-Pérez, A. J. (2024). *El Paisaje como unidad de análisis para evaluar la Susceptibilidad a Deslizamientos de la Cuenca Arroyo Sabinal, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. [Tesis de Maestría, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas].
- Domínguez L., Castañeda A. y González A. (2016). Análisis de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos y sus posibles aplicaciones en un sistema de alerta temprana por inestabilidad de laderas, Informe interno, Cenapred, México, pp. 28.
- García, E. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). (1998). Conjunto de Datos Vectoriales de climatología (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1 000 000. México.
- Gómez Ramírez, M., Gonzáles Herrera, R., Paz Tenorio, J. A. y Velasco Herrera, J. A. (2016). Caracterización de procesos gravitacionales en diferentes ambientes geológicos de Chiapas, México. *Espacio I+D Innovación más Desarrollo* 5 (12) 116-130. doi: 10.31644/IMASD.12.2016.a08.
- González Huesca, A. E., Domínguez Morales, L., y Castañeda Martínez, A. (2015). Generación de insumos para el Atlas Nacional de riesgos. Mapa Nacional de susceptibilidad por inestabilidad de laderas. Cenapred. Coordinación Nacional de Protección Civil. Secretaría de Gobernación.
- Huang, Y. y Zhao, L. (2018). Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines. *ELSEVIER. Catena*. 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.003>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1985). Conjunto de Datos Vectoriales de Edafología. Escala 1:250 000 Serie I. Continuo Nacional Tuxtla Gutiérrez. Edafología (inegi.org.mx).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1985). Conjunto de Datos Vectoriales de Litología. Escala 1:250 000. Serie I. Continuo Nacional Geología (inegi.org.mx).
- Jiménez, J. A. y Aristizábal, E. (2018). Propuesta metodológica para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales: Caso de estudio Tramo 2, vía Medellín – Turbo. *Boletín de Ciencias de la Tierra*. Universidad Nacional de Colombia. Pp. 14-23.
- Lakakis, K. y Savvaidis, P. (2009). Landslide Definition by an Integrated Monitoring System. ResearchGate. Fifth International Conference on Construction in the 21st. Century (CITC-V) "Collaboration and Integration in Engineering, Management and Technology". Istanbul. Turkey. <https://www.researchgate.net/publication/272701508>
- López, I. (24 de noviembre de 2020). El deslizamiento de laderas es causa de orografía. *El Heraldo de Chiapas*. <https://www.elheraldodechiapas.com.mx/local/el-deslizamiento-de-laderas-en-chiapas-cause-de-orografia-experta-danos-carreteras-montanas-6052764.html>
- Mateo Rodríguez, J. M. (2000). *Geoecología de los paisajes: bases para la planificación y la gestión ambiental*. La Habana.
- Miklós, L., Kočícká, E., Izakovičová, Z., Kočícký, D., Špínerová, A., Diviaková, A., y Miklósová, V. (2019). *Landscape as a Geosystem*. The Approaches to the Definition of the Landscape. Springer International Publishing. doi.org/10.1007/978-3-319-94024-3_2
- Mora Castro, S. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*. pp. 49-58.

- Paz Tenorio, J. A., Gómez Ramírez, M. González Herrera, R. y Domínguez Salazar, F. F. (2011). Los procesos de remoción en masa; génesis, limitaciones y efectos en el crecimiento urbano de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *Revista Geográfica de América Central*, vol 2. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. pp. 1-18. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=451744820602>
- Oregel Romero, A., Cuevas Salgado, S., Salvador Flores, R., Moreno Ruiz, J. P., Barrios Sánchez, J. L., Cázares Ventura, A., Ávila Ramos, F., Castillo Rodríguez, F., De Los Santos Montaña, J., Arceo y Cabrilla, F. y Cuevas Covarrubias, A. (2016). Atlas de riesgos del estado de Chiapas. Servicio Geológico Mexicano. Informe Técnico.
- Paz Tenorio, J. A., González Herrera, R., Gómez Ramírez, M. y Velasco Herrera, J. A. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones Geográficas*. Núm. 92. Pp. 1-16. Instituto de Geografía. Distrito Federal. México. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56950566011>
- Ramírez-Sánchez, L. G., Priego, A. y Bollo, M. (2021). Modificación antropogénica de la cubierta vegetal de los paisajes naturales de Michoacán. En: Arredondo, C. (coord.). Paisaje y Territorio en el Occidente Michoacano. Programa Editorial Unidad Académica de Estudios Regionales. pp. 215-244.
- Rodríguez Van Gort, M. F. T. y Rivera González, O. D. (2023). Afectaciones en la Vivienda por deslizamientos de tierra y vinculación con la población por medio de modelos preventivos, México. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras.
- Ruíz Arriaga, D. (2014). *Actualización del mapa geológico de Tuxtla Gutiérrez*, [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Suárez, J. (2009). Zonificación de Susceptibilidad, Amenaza y Riesgo. En Deslizamientos. Análisis Geotécnico. p. 533. Colombia. Escuela de Filosofía.

Acerca de los autores

Luis Giovanni Ramírez Sánchez

Doctor en Geografía por el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental UNAM-Campus Morelia. Actualmente es investigador por México SECIHTI comisionado a El Colegio Mexiquense A. C. y profesor en el CIGA-UNAM-Morelia, Universidad de Guadalajara y Universidad de Guanajuato. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel I. Sus líneas de investigación son el análisis espaciotemporal de ambientes urbanos y paisajes físico-geográficos, gentrificación, justicia espacial y ordenamiento ecológico territorial. Entre sus últimas publicaciones destacan, en coautoría: Inclusión de la variable espacial en la medición de las condiciones relativas de vida en ciudades mexicanas.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0509-3413>

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Luis-Giovanni-Sanchez?ev=hdr_xprf

Google Scholar: <https://scholar.google.es/citations?hl=es&pli=1&user=C-RnP-2YAAAAJ>

Iván Vilchis Mata

Doctorado en Ciencias del Agua por la Universidad Autónoma del Estado de México. Investigador por México SECIHTI comisionada a El Colegio Mexiquense A. C., México. Forma parte del Seminario de Estudios Urbanos y Socioespaciales. Es miembro del SNII nivel I. Sus líneas de investigación son las ciencias sociales espacialmente integradas. Sus trabajos se enfocan en el estudio de las ciudades desde

una perspectiva geográfica integral de las dimensiones económica, ambiental y social. Entre los temas recientes destacan los sectores intensivos en conocimiento, recursos hídricos, desigualdad, accesibilidad, inmovilidad y TIC.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3275-585X>

Danays del Carmen Castelo Agüero

Doctora en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México. Entre sus reconocimientos se destacan que haya sido beneficiaria de una beca de excelencia académica para cursar estudios de maestría en México, Fundación Heinrich Böll, Ciudad de México, 2012; y una mención honorífica en estudios de maestría UNAM 2014. Actualmente realiza una estancia posdoctoral de incidencia de CONAHCYT, en El Colegio Mexiquense. Además, forma parte del grupo de investigadores del proyecto CONAHCYT-PRONACES “El ecosistema del libro en el Estado de México. Hacia un Observatorio de la lectura”. Su principal línea de investigación es el análisis espacial de fenómenos sociales.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9111-9469>

Carlos Misael Rivera Sánchez

Licenciado en Planeación Territorial por la Universidad Autónoma del Estado de México. Obtuvo el diploma de Especialista en Cartografía Automatizada, Teledetección y Sistemas de Información Geográfica por la Universidad Autónoma del Estado de México. Actualmente participa en estancias de investigación por parte del programa “Investigadoras e investigadores COMECYT” por el Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT). Líneas de investigación: movilidad no motorizada, estructura urbana, accesibilidad y envejecimiento demográfico.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8792-3364>

Juan Campos Alanís

Doctor en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México, maestro en Estudios Regionales por el Instituto de Investigaciones Sociales “Dr. José María Luis Mora” y licenciado en Planeación Urbana por la Universidad Autónoma del Estado de México. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel II. Actualmente se desempeña como profesor de tiempo completo “E” de la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México. Sus líneas de investigación se relacionan con el análisis espacial, las condiciones relativas de vida, justicia espa-

cial, procesos urbanos y segregación residencial. Ha fungido como evaluador del SNII, de proyectos Conacyt y Perfiles Deseables de la SEP; es tutor externo de los posgrados en Geografía y Urbanismo de la UNAM, del posgrado de Estudios Urbanos de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez; asimismo, forma parte del grupo de investigación INTEGRA de El Colegio Mexiquense A. C. y es colaborador del Programa Universitario de Estudios de la Ciudad (PUEC) de la UNAM.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5391-2447>

Scopus: 55372360700

Hugo Montes de Oca Vargas

Economista por la Facultad de Economía de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). Maestro en Demografía por El Colegio de la Frontera Norte (COLEF), cuenta con estudios de doctorado del Programa Estudios de Población por El Colegio de México (Colmex). Profesor-investigador del Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población (CIEAP) de la UAEMéx, es Perfil Deseable PROMEP. Cuenta con diversas publicaciones entre ellos libros, capítulos de libros y artículos científicos en diversas revistas indexadas. Líneas de investigación: Dinámica demográfica, envejecimiento de la población, envejecimiento y familia, envejecimiento y mercados laborales, envejecimiento y salud, cuidados y dependencia y envejecimiento y migración. Es actualmente director de la Revista Huellas de la Migración, editada por la UAEMéx.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8844-7717>

Scopus: 35079046400

Noelia Cecilia Principi

Doctora en Geografía por la Universidad Nacional del Sur (Argentina). Es Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio del medio ambiente, profesora y licenciada en Geografía por la Universidad Nacional de Luján (Argentina). En la Universidad Nacional de Luján es docente-investigadora, dedicación exclusiva, del Departamento de Ciencias Sociales y Coordinadora del Laboratorio de Análisis Espacial y Sistemas de Información Geográfica, del Instituto de Investigaciones Geográficas. Forma parte de la Red Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica, donde está a cargo de la vinculación internacional. Es investigadora asistente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), sus líneas principales de investiga-

ción se centra en el análisis espacial cuantitativo con Sistemas de Información Geográfica para identificar potenciales conflictos entre usos del suelo en el partido de Luján (Argentina). Es autora de cinco libros sobre Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica y de artículos científicos publicados en Argentina, Chile, Costa Rica, Ecuador, México y Venezuela. Se destaca la publicación del libro *Análisis espacial de conflictos entre usos del suelo en la cuenca del Río Luján* en la Colección Ciencias de la Editorial Universidad Nacional de Luján.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8819-6743>

Scopus: 57204362582

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Noelia-Principi>

Google Scholar: <https://scholar.google.com.ar/citations?user=Sq2CZq0AAAA-J&hl=es>

Ricardo Eliú Lozoya-Ponce

Doctor en Ciencias Aplicadas por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México). Obtuvo el grado de maestro en Ciencias Aplicadas por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Obtuvo la licenciatura en Electrónica por la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Se ha desempeñado como profesor docente en Universidad Cuauhtémoc, Universidad del Valle de México y Universidad Tecnológica de San Luis Potosí. Director de Departamento de Ingeniería y profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey campus S. L. P. En la actualidad es profesor investigador del Tecnológico Nacional de México–Instituto Tecnológico de Chihuahua, México. Donde realiza investigaciones sobre Instrumentación de Sistemas de Potencia, Redes Neuronales, Autómatas Celulares, Sistemas Digitales, Telecomunicaciones. Ha publicado más de 15 investigaciones, como autor principal y como coautor.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9927-2011>

Scopus: 55625416500

Eduardo Jiménez-López

Doctor en Ciencias Aplicadas por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México). Obtuvo el grado de maestro en Ciencias Aplicadas por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Obtuvo la Licenciatura en Electrónica por la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Se ha desempeñado como profesor-investigador en El Colegio Mexiquense A.C. fue Coordinador

de la maestría en Ciencias Sociales con Especialidad en Desarrollo Municipal. Docente en Universidad Autónoma del Estado de México en la Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle de México, Universidad Marista de San Luis Potosí y Universidad Tecnológica de San Luis Potosí. En la actualidad es profesor de la Facultad de Geografía en la Universidad Autónoma del Estado de México, donde realiza investigaciones sobre crecimiento de ciudades, migración, redes neuronales, autómatas celulares, cadenas mákov, sistemas dinámicos caóticos, sincronización caótica. Ha publicado 27 investigaciones, como autor principal y como coautor. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1883-3890>

Román Sánchez Dávila

Licenciado en Economía y maestro en Estudios Sustentables, Regionales y Metropolitanos por la Universidad Autónoma del Estado de México; estudiante del doctorado en Urbanismo por la misma institución. Apasionado por la modelización estadística y econométrica aplicada con factores temporales y espaciales. Entre sus líneas de investigación trabaja migración y remesas vinculada a procesos territoriales como la formación de capital humano, el desarrollo local, la capitalización de negocios y microempresas, las manifestaciones urbanas y transformaciones territoriales en lo local. Autor de al menos cinco artículos científicos, dos capítulos de libro y otros documentos de divulgación. Estudiante activo del consorcio “International Rural Policy Studies” (ICRPS), alumni at the 16th annual ICRPS Summer Institute held by Lapland University, Rovaniemi Finland, 2019. Miembro de la Red Internacional sobre Estudios del Territorio (REIT) México-Colombia-Panamá. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2292-4119>

Ayesa Martínez Serrano

Doctora en Ciencias Geográficas por el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México. Obtuvo la maestría en Geomática y la Ingeniería en Hidrografía y Geodesia en la Academia Naval Granma de La Habana, Cuba. Se ha desempeñado como coordinador de la carrera de Geografía Aplicada y profesor-investigador en la Escuela Nacional de Estudios Superiores, unidad Mérida. En la actualidad es profesor adscrito al Departamento de Humanidades y Sistemas Sociales de la misma escuela. También es miembro del Sistema Nacional de Investigadores en México, reconocido en la categoría nivel I. Sus principales líneas de investigación tienen enfoque desde la Geografía

Aplicada, la Geoecología del Paisaje y la Aplicación de las Tecnologías de la Información Geográfica. Ha publicado más de diez documentos científicos entre artículos indexados y capítulos de libros.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6987-6815>

ID' Scopus: 2-s2.0-85128827728

Researchgate: <https://www.researchgate.net/profile/Ayesa-Martinez>

Google Scholar: <https://scholar.google.es/citations?user=mheJZs8AAAAJ&hl=es>

Michelle Monserrath Revelo Suarez

Es magister en Planificación y Prospectiva Multisectorial por la Universidad de Posgrados IAEN. Obtuvo la Ingeniería de Geografía y Planificación Territorial y fue becaria en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Fue Analista de Administración y Control Forestal en el Ministerio del Ambiente del Ecuador. Ha trabajado como investigadora científica en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y en la primera Universidad de Posgrados en el Ecuador el Instituto *de Altos Estudios Nacionales*. Su área de investigación y trabajo son los datos geográficos y la planificación territorial, el análisis espacial, el urbanismo, la prospectiva estratégica en búsqueda de soluciones mediante políticas públicas frente a los nuevos desafíos relacionados con las nuevas racionalidades y dinámicas gestadas por las diferentes estructuras locales. Consultora en la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Ha recibido el Reconocimiento por la Asociación de Futuristas de México. En la actualidad es jefa de Información Geográfica y Jefa de Usos de suelo en el Municipio de Francisco de Orellana en la ciudad Petrolera del Ecuador, donde trabaja en herramientas de planificación y emite permisos de uso y ocupación de suelo conforme las actividades económicas.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3542-8093>

Karla Teresa Rojas Moreno

Doctora en Urbanismo por la Universidad Nacional Autónoma de México. Se ha desempeñado como consultor en análisis socioeconómicos y urbanos en instrumentos de ordenamiento territorial, planeación urbana y atlas de riesgos en distintas partes de México. Ha sido profesora de diversas asignaturas en licenciatura en la Unidad Académica Profesional Chimalhuacán de la Universidad Autónoma del Estado de México. En la actualidad es estancia posdoctoral inicial CONAHCYT en El Colegio Mexiquense A.C., donde realiza investigaciones sobre análisis espa-

ciotemporal de la población adulta mayor y sus necesidades. También es miembro del Instituto Mexicano de Urbanismo, el Colegio de Urbanistas de Puebla A. C. y la Red de Mujeres Investigadoras por la Ciencia Abierta. Entre sus últimas publicaciones se encuentran el capítulo de libro “Acceso a servicios de salud de personas de edad a nivel municipal en México: equipamientos de salud y vejez para 2021”, en *Envejecer en el lugar*, así como “Adultos mayores y unidades de salud en el Área Metropolitana de Toluca 2020-2022: accesibilidad y localización”, de la revista *Estudios Socioterritoriales*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0916-4429>

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Karla_Teresa_Rojas_Moreno

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=0NyBGqQAAAA-J&hl=es>

José Francisco López Toledo

Estudiante de doctorado en Geografía en la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Obtuvo la maestría en Ciencias con especialidad en Forestal, por el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos y la licenciatura en Biología por la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional (México). Docente de la carrera de Ingeniería Forestal y del Posgrado en Agroecosistemas Sostenibles en el Tecnológico Nacional de México campus I. T. de la Zona Maya, Quintana Roo, y consultor en temas ambientales y forestales, socio fundador de la empresa Competitividad y Desarrollo Sustentable SC (CODES). Su principal línea de trabajo es la ecología forestal en ecosistemas tropicales. Fue investigador en la Red de Manejo Forestal Sustentable en el Instituto de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Chetumal.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7080-2795>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Jose-Lopez-Toledo>

José Manuel Camacho Sanabria

Doctor en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma del Estado de México. Obtuvo la maestría en Análisis Espacial y Geoinformática y licenciatura en Geografía por la Universidad Autónoma del Estado de México. Actualmente es investigador de cátedra CONAHCYT comisionado a la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (nivel 1). Sus principales líneas de generación y aplicación del conocimiento son 1) análisis

espacial del territorio y 2) resiliencia y gestión del riesgo por inundaciones pluviales. Es miembro activo de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim) y de la Red Iberoamericana para la Formación de Comunidades Resilientes ante Riesgos y Desastres por Eventos Naturales Extremos (RIFOREDEX). Es responsable del proyecto “Resiliencia comunitaria ante el riesgo por inundaciones pluviales en la colonia Proterritorio, Chetumal, Quintana Roo (México)”.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0366-0613>

Scopus: 56820283800

Research Gate: <https://www.researchgate.net/profile/Jose-Camacho-Sanabria>

Google Scholar: <https://scholar.google.com.mx/citations?user=-YZxOjwAAAA-J&hl=es>

Juan Carlos Alcérreca Huerta

Doctor en Ingeniería con especialidad en ríos y costas por la Technische Universität Braunschweig en Alemania. Obtuvo la maestría y licenciatura en Ingeniería Civil por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Posdoctorando en el Instituto de Ingeniería de la UNAM y actualmente es Catedrático CONAHCYT comisionado a ECOSUR-Chetumal como parte del proyecto “Monitoreo de la dinámica de la zona costera y oceánica del sur del Golfo de México y Mar Caribe”, y perteneciente al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) nivel II. Ha colaborado en la integración del Centro Mexicano de Innovación en Energías-Océano (CEMIE-Océano) para dar pie al estudio, análisis y aprovechamiento de las energías marinas en el país, así como de los sistemas de infraestructura costera. Reconocimientos como la medalla Gabino Barreda (al mérito universitario) han sido recibidos, junto con apoyos para la realización de estudios tanto en México como en Alemania.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6325-3118>

Scopus: 2-s2.0-85128480694

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Juan-Alcerreca-Huerta>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=agdEif0AAAAJ&hl=es>

Rosalía Chávez Alvarado

Es doctora en filosofía con orientación en asuntos urbanos por la Universidad Autónoma del estado de Nuevo León. Actualmente Investigadora por México Secihti adscrita a la Universidad Autónoma del estado de Quintana Roo. Participa activa-

mente en la REDESCLIM de Secihti, y en la red iberoamericana RIFOREDEX participando en congresos, seminarios y publicaciones. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores, nivel I. Sus líneas de investigación: Gestión del riesgo de desastre ante inundaciones, vulnerabilidad social, resiliencia comunitaria ante inundaciones y envejecimiento y cambio climático. Es co-coordinadora del libro *Estrategias para la gestión del riesgo ante desastres por huracanes e inundaciones en ciudades del Caribe mexicano: Chetumal, Tulum y Playa del Carmen*. CLAVE Editorial con registro en Secihti. ISBN 978-607-437-615-9 (AM Editores). México (2022).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3468-9283>

ID Scopus 55764289400.

Pedro Gómez Molina

Maestro en Geografía con énfasis en Manejo Integrado de Paisaje por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y licenciado en Ciencias Ambientales por la misma casa de estudios. Actualmente es doctorante en Estudios Novohispanos por la Universidad Autónoma de Zacatecas; ambos posgrados con reconocimiento CONAHCYT. Ha desarrollado estancias de investigación internacionales (Universidad de Burgos, España, y la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro), en temas de ecología histórica y metabolismo social. Ponente en congresos nacionales e internacionales. Profesor de asignatura en instituciones públicas y privadas. Actualmente desarrolla un proyecto para el estudio de la labor de ingenieros militares en el periodo novohispano, en la UNAM. Su línea de investigación se ha enfocado en la interpretación de mapas históricos para análisis territoriales, en especial del periodo virreinal y la transición al México Independiente. Asimismo, ha desarrollado análisis espaciales en perspectiva histórica por medio de Sistemas de Información Geográfica.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8397-4215>

Researchgate: <https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Molina-6>

Google Scholar: https://scholar.google.es/citations?user=K5LvO_cAAAAJ&hl=es&oi=ao

Pedro Sergio Urquijo Torres

Doctor en Geografía (UNAM), maestro en Historia (UMSNH) y licenciado en Historia (UNAM). También cursó la maestría en Estudios Mesoamericanos (UNAM). Investigador titular de tiempo completo en el Centro de Investigaciones en Geo-

grafía Ambiental de la UNAM, en el área de Historia Ambiental, Poder y Territorio. Investigador Nacional Nivel II (SNI-CONAHCYT). Cuenta con más de 30 artículos publicados en revistas arbitradas, 17 libros y poco menos de 50 capítulos de libro. Sus líneas de investigación giran en torno a la geografía histórica, la historia ambiental, los estudios de paisaje cultural y la organización territorial de los pueblos indios en la época colonial.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9626-0322>

Research Gate: <https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Urquijo-Torres-2>

Google Scholar: https://scholar.google.es/citations?user=_x7o-VEAAAAJ&hl=es&oi=ao

Ana Judith de Coss Pérez

Maestra en Gestión de Riesgos y Cambio Climático por la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Se ha desempeñado en la participación y coordinación de proyectos socioambientales, talleres comunitarios, geoprocusamiento espacial en Cecropia soluciones locales a retos globales A. C. Entre los trabajos elaborados se encuentran *El impacto de la pérdida de cobertura vegetal en el balance hídrico en la microcuenca La Unión, en el municipio de Chiapa de Corzo* (tesis de licenciatura); *El paisaje como unidad de análisis para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos de la Cuenca Arroyo Sabinal, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas* (tesis de maestría).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5073-5901>

Horacio Morales Iglesias

Doctor en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente es Profesor-investigador de tiempo completo en el Instituto de Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, en donde es profesor de diversas asignaturas en la licenciatura en Ciencias de la Tierra y la maestría en Gestión de Riesgos y Cambio Climático. Actualmente desarrolla la línea de investigación en Geografía del Paisaje y Geoecología aplicada a temas ambientales y riesgo. También es miembro de la Sociedad Mexicana de Geomorfología.

ORCID: <https://orcid.org/>

Análisis espacial. Aplicaciones y retos para el futuro, de Luis Giovanni Ramírez Sánchez, Iván Vilchis Mata, Danays del Carmen Castelo Agüero (coordinadores), publicado por Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., se terminó de imprimir en marzo de 2025, Litográfica Ingramex, S. A. de C. V., Centeno 162-1, Granjas Esmeralda, 09810, Ciudad de México. El tiraje fue de 300 ejemplares impresos y en versión digital para acceso abierto en los formatos PDF, EPUB y HTML.

Este libro muestra la relevancia de la perspectiva espacial para analizar y comprender la distribución y patrones de comportamiento de diversos fenómenos. A través de nueve contribuciones realizadas por especialistas de México, Argentina y Ecuador, se evidencia la importancia del análisis espacial en la gestión del territorio, lo que ofrece un claro ejemplo de cómo se pueden abordar las dinámicas espaciales desde disciplinas diversas, como la geografía, la planificación urbana, la ecología y la economía, por mencionar algunas. En el libro se abordan desafíos contemporáneos, como el envejecimiento poblacional y su impacto en la movilidad de los adultos mayores, la expansión urbana a través de modelos como autómatas celulares y la gestión territorial mediante un enfoque socioambiental. También se examinan fenómenos como la gentrificación y la distribución de recursos de salud y educación, además de la gestión de riesgos asociados a incendios forestales y deslizamientos de ladera. Cada capítulo destaca las ventajas de aplicar el análisis espacial a diversos temas de interés actual e internacional. Este libro brinda una serie de herramientas espaciotemporales que permiten contribuir en la resolución de problemas complejos y mejorar la planificación territorial.



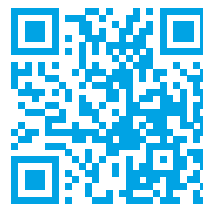
Luis Giovanni Ramírez Sánchez es Doctor en Geografía por el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, miembro del SNII de la SECIHTI (nivel I), investigador comisionado a El Colegio Mexiquense A. C. Integrante del Seminario de Estudios Urbanos y Socioespaciales. Líneas de investigación: paisajes urbanos y antroponaturales, justicia espacial, gentrificación y *spatial shift share*.



Iván Vilchis Mata es Doctor en Ciencias del Agua por la Universidad Autónoma del Estado de México. Investigador por México SECIHTI comisionado a El Colegio Mexiquense A. C. Forma parte del Seminario de Estudios Urbanos y Socioespaciales. Miembro del SNII (nivel I). Líneas de investigación: ciencias sociales espacial y temporalmente integradas.



Danays del Carmen Castelo Agüero es Doctora en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México. Investigadora posdoctoral de Incidencia (SECIHTI) en El Colegio Mexiquense. Integrante del grupo de investigadores del proyecto “El ecosistema del libro en el Estado de México. Hacia un Observatorio de la lectura”. Principal línea de investigación: análisis espacial de fenómenos sociales.



DOI.ORG/10.52501/CC.279



**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES
ARBITRADAS

HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS
www.comunicacion-cientifica.com

ISBN 978-607-228-41-04



9 786072 284104